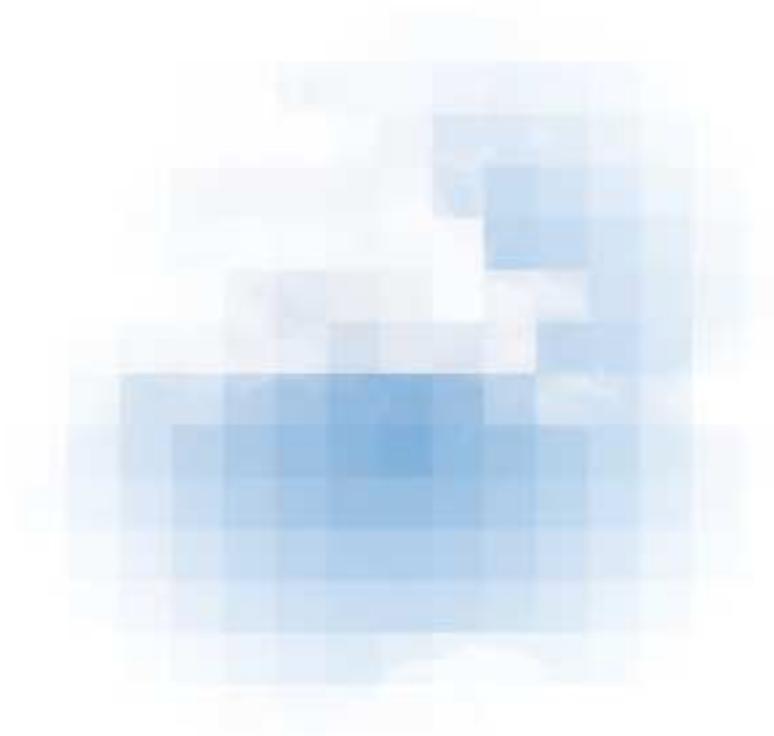


RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT 2001





Direction générale
1, quai Branly - 75340 Paris cedex 07
Tél. : 01 45 56 71 71

SOMMAIRE

Modélisation 2

**Processus
atmosphérique** 6

**Campagnes
expérimentales** 12

**Étude du climat
et de l'environnement
de la planète** 16

**Développements
instrumentaux** 22

**Activités
de développement** 26

Organigramme du CNRM 32

3D-VAR	Assimilation variationnelle tridimensionnelle	IGN	Institut Géographique National
4D-VAR	Assimilation variationnelle quadrimensionnelle	IMFT	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
AASQA	Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air	INERIS	Institut National de l'Environnement et des Risques
ACE 2	campagne internationale sur les aérosols et leur influence sur le climat	INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
ADEOS	Satellite d'observation de la terre en orbite polaire (USA)	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
AIRPARIF	Association chargée de la surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France	ISBA	Schéma numérique d'échanges sol-végétation-atmosphère
ALADIN	Projet de Lidar vent satellital	LA	Laboratoire d'Aérodologie (CNRS/Université Paul Sabatier de Toulouse)
ALADIN	ersion à domaine limité du modèle Arpège	LACE	Programme de recherche en prévision numérique
ALADIN-	NH Version non hydrostatique d'Aladin	LEGOS	Laboratoire d'études en Géophysique et Océanographie Spatiales
ALATNET	u de recherche et de formation relatif à Aladin	LGGE	Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
ARAT	vion de recherche Atmosphérique et de Télé-détection	LIDAR	Radar à laser
ARAMIS	Réseau opérationnel de radars précipitations de Météo-France	LISA	Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques
ARGOS	Système de positionnement d'un mobile par satellite	LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésio-Echelle	LOA	Laboratoire d'Optique Atmosphérique
ARPEGE	Modèle global de prévision numérique opérationnel de Météo-France	LODYC	Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie
ARPEGE-CLIMAT	Modèle de recherche de Météo-France (CNRM) sur le climat	LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
ASPIC	Expérimentation dans le domaine de la prévision immédiate	LTHE	Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement
ASPOC	Application de Signalisation et de Prévision d'Orages pour le Contrôle aérien	MAP	Projet international et expérience de terrain associée relatifs à l'étude des phénomènes de méso-échelle sur les Alpes
AVHRR	adiomètre perfectionné à très haute résolution	MASSIF	Projet relatif à l'étude des aspects météorologiques de IASI
BBC	Expérience " Baltex Bridge Cloud "	MEPRA	Système expert d'aide à la prévision des avalanches
CAM	Centre d'Aviation Météorologique (Météo-France)	MERCATOR	Projet de modèle opérationnel de l'océan mondial
CEN	Centre d'Etudes de la Neige (Météo-France)	MESO-NH	Modèle Non-Hydrostatique de recherche
CEPMET	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	METEOSAT	Satellite Météorologique géostationnaire européen
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	METOP	Futur satellite européen défilant à orbite polaire
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère	MOCAGE	Modèle planétaire de chimie de la troposphère et de la stratosphère
CETP	Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires	MODCOU	Modèle hydrologique
CLOUDY COLUMN	Composante de l'expérience ACE2 relative au couplage entre propriétés physico-chimiques des aérosols et propriétés radiatives des nuages	MOZAIC 2	Mesure de l'Ozone sur des avions Airbus Commerciaux
CMM	Centre de Météorologie Marine (Météo-France)	MOZART	Mesures d'Ozone à bord d'Avions Régionaux et de Trains à Grande Vitesse
CMS	Centre de Météorologie Spatiale (Météo-France)	MSG	Satellite Météosat de Seconde Génération
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales	NCAR	Centre National de Recherche Atmosphérique (USA)
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France)	NIVOSE	Station automatique de Haute montagne
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	NOAA	Administration Américaine pour les Océans et l'Atmosphère
COARE	Expérience sur les redactions du système couplé océan-atmosphère	OASIS	Programme de couplage de modèles atmosphérique et océanique
COST	Coopération Européenne Scientifique et Technique	OLIVE	Outil de Lancement Interactif et de Visualisation d'Expériences
CROCUS	Modèle d'évolution du manteau neigeux	OMM	Organisation Météorologique Mondiale
DDE	Direction Départementale de l'Equipeement	ONERA	Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
DEMETER	Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to interannual prediction	OPA	Modèle de simulation océanique
DIR	Direction Interrégionale de Météo-France	PATOM	Programme Atmosphère et Océan à Mésio-Echelle (Insu)
DLR	Organisation national allemand de recherche et d'essais dans les Domaines spatial, atmosphérique et environnemental	PIRATA	Réseau (pour la recherche) de bouées ancrées dans l'Atlantique Tropical
DP	Direction de la production (Météo-France)	PNCA	Programme Nationale de Chimie Atmosphérique
DRAST	Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère des Transports	PNEDC	Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat
DSI	Direction des systèmes d'informations (Météo-France)	PNRH	Programme National de Recherche en Hydrologie (Insu)
DSO	Direction des systèmes d'observation (Météo-France)	PNRN	Programme National Risques Naturels
DYCOMS	DYNAMICS and CHEMISTRY OF MARINE STRATOCUMULUS	PNTS	Programme National de Télé-détection Spatiale
ECSN	Réseau de soutien européen aux études climatiques	POI	Période d'Observation Intensive
EGOS	Groupe européen sur les stations de mesures en mer	POLDER	Radiomètre embarqué sur le satellite Adeos
ENVISAT	Projet de satellite européen d'étude de l'environnement	POMME	Programme Océanographique Multidisciplinaire Mésio-Echelle
ENM	Ecole Nationale de la Météorologie (Météo-France)	PROMISE	Predictability and variability of monsoons and the agricultural and hydrological impacts of climate change
ERA-Interim	Re-Analysis (ré-analyse de situations météorologiques passées par le CEPMMT)	PYREX	Expérience relative à l'influence d'un relief montagneux sur
ERS1 et ERS2	Satellites européens de télé-détection de la Terre	RAMCES	Réseau Atmosphérique des Gaz à Effet de Serre L'écoulement atmosphérique (Pyrénées, 1990)
ESA	Agence Spatiale Européenne	RANDOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observation Météorologiques Etendu
ESCOMPTE	Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution Atmosphérique et de Transports d'Emissions	RASS	Système de sondage acoustique de l'atmosphère associé à un radar ST
ESQUIF	Etude et Simulation de la Qualité de l'Air en Ile-de-France	RDT	Rapidly Developing Thunderstorm, produit de prévision des orages à partir des données de MSG
EUCREX	Expérience européenne sur les nuages et le rayonnement (1994)	REPROBUS	Modèle de chimie stratosphérique
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques	SAF	Satellite Application Facility
EUROSTARRS	Campagne de mesures organisée par l'agence spatiale européenne pour l'évaluation du projet SMOS	SAFRAN	Système d'analyse des données nivo-météorologiques
FASTEX	Expérience sur le "rail" des dépressions atlantiques et les fronts, conduite en Atlantique nord début 1997	SEVIRI	Imageur visible et infra-rouge du futur satellite Météosat seconde génération
GAME	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique (Unité de Recherche Associée 1357 CNRS/Météo-France)	SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
GDR	Groupe de Recherche	SMOS	"Soil Moisture and Ocean Salinity", projet de mesure satellitaire de l'humidité des sols et de la salinité de l'océan
GELATO	Modèle dynamique et thermodynamique de banquise	SNOWMIP	Snow Models Intercomparison Project
GELCRO	Projet portant sur les interactions entre neige et chaussée	SYAGE	Programme d'étude des tourbillons de sillage des aéronefs (aéroport de Toulouse Matabiau)
GICC	Gestion et Impacts du Changement Climatique, programme du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement	SYMPOSIUM	Système automatisé multi-usagers de diffusion de prévisions par zones climatiques homogènes
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat	TEB	Schéma de surface pour la modélisation des zones urbaines
GIVRAGE	Etude du givrage des avions	TOGA	Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe
GPS	Système de positionnement par satellite	TOVS	Sondeur vertical opérationnel des satellites défilants américains
GSWP	Programme de recherche sur l'humidité des sols	UHF	Gamme des "ultra-hautes fréquences"
HAPEX	Expérience pilote sur les relations entre les facteurs hydrologiques et atmosphériques	UKMO	Service Météorologique du Royaume-Uni
IASI	Interféromètre infra-rouge satellital de EPS	UTC	Temps Universel Coordonné
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer	UV	Ultra-Violets
IFS	Modèle de prévision numérique du CEPMMT	VHF	Gamme des "très hautes fréquences"
IGBP	Programme international "Géosphère-Biosphère"	WAMP	Projet relatif à l'étude de la mousson d'Afrique de l'ouest
		WIND	Lidar Doppler Aéroporté

Modélisation

En modélisation, opérationnelle ou de recherche, si l'on porte classiquement au crédit de l'année son lot d'améliorations et d'innovations, c'est surtout l'engagement commun des deux filières dans le projet "Arome" de futur modèle opérationnel de prévision à 2-3 km de résolution (horizon 2008) qui fait date pour l'avenir...

Une nouvelle génération de modèles : vers des prévisions encore plus fines.

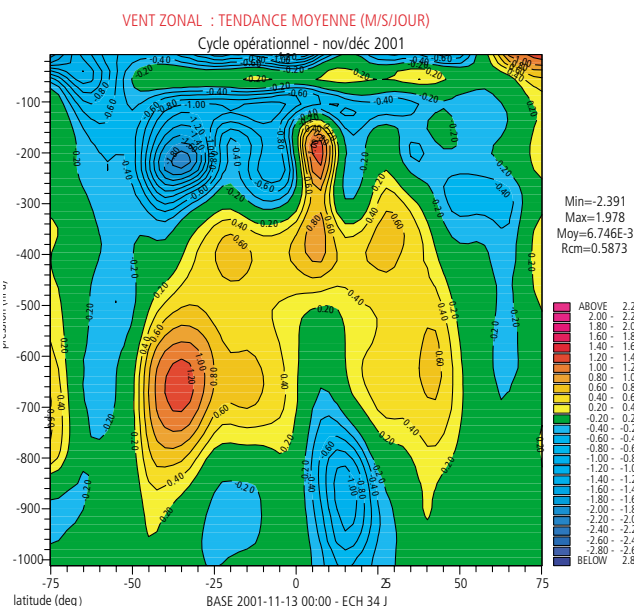
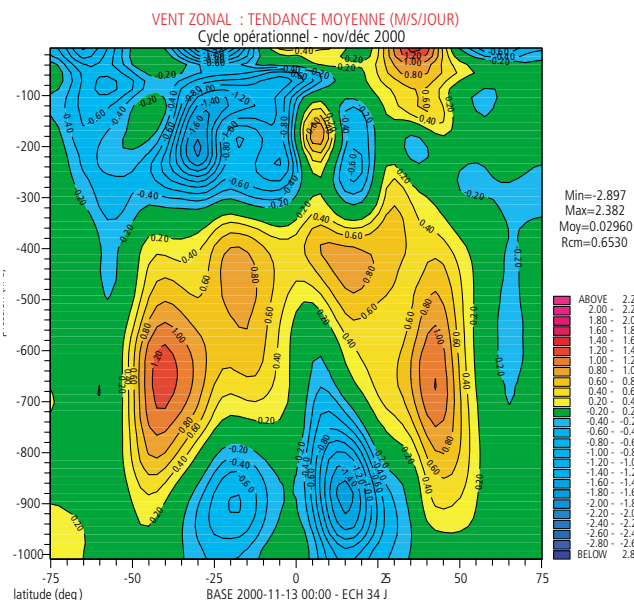
Les chercheurs ont mis au point des modèles ultrasophistiqués pour leurs études en physique de l'atmosphère. Ces avancées doivent profiter à la future prévision opérationnelle. Météo-France s'est lancé dans un nouveau défi en mettant en place un projet de système de prévision à maille horizontale de l'ordre du kilomètre pour 2008. Un tel système représentera précisément les nuages et les influences géographiques locales. Il saura bien prévoir des phénomènes concrets comme la couverture nuageuse, les précipitations, les vents et les brouillards. Les données utilisées comprendront les images du futur satellite Météosat Seconde Génération et des radars de surveillance des précipitations, et les informations issues du futur réseau Radome de stations automatisées sur la France. Le modèle numérique de prévision gèrera les accélérations verticales du vent, la turbulence de l'air, les différents types d'eau et de glace nuageuses, et d'espèces chimiques.

Avec un tel système, l'anticipation des catastrophes naturelles (orages, inondations, rafales de vent) serait améliorée, avec une grande précision géographique. Les prévisions au jour le jour reflèteraient mieux le temps effectivement subi par le grand public. De meilleurs services seraient rendus aux usagers spécialisés : aéroports, routes, chantiers, montagne, pollution urbaine, événements sportifs, agriculture, hydrologie... Les demandeurs d'un tel système sont innombrables. Météo-France souhaite également apporter une réelle valeur ajoutée dans la prévision à des échéances très courtes, de quelques heures seulement.

Pour y parvenir, les chercheurs du Cnrm rassembleront leurs efforts et tisseront de nouvelles collaborations nationales et internationales pour que la première maquette du futur système soit visible dès 2004 !

Paramétrisations physiques dans le modèle global Arpège : des progrès sur les aspects "dynamiques"

Après plusieurs années d'effort pour réduire les principaux défauts thermodynamiques (biais en température ou en humidité) du jeu de paramétrisations physiques d'Arpège, les chercheurs de Météo-France se sont davantage intéressés en 2001 aux bilans de quantité de mouvement. A cela deux raisons : le modèle était (et reste à un bien moindre degré) trop zonal lorsqu'on le compare à la réalité, et trop actif aux plus petites échelles. Bien qu'apparemment contradictoires, ces deux défauts résultaient d'un manque de friction dans les basses couches et d'au contraire trop de friction en altitude.



Coupes altitude/latitude des biais du modèle dans le cycle d'assimilation pour les périodes novembre-décembre 2000 et 2001. Les modifications intervenues sur le modèle améliorent, entre autres, les résultats sur les vents d'ouest aux latitudes 40-50° N et les alizés entre 15°N et 20°S

Un jeu de modifications adéquates (nommé Cycora-ter) a été développé, dont la quatrième version essayée a été jugée satisfaisante après tests sur quatre périodes indépendantes de l'année. Cette nouvelle version a été rendue opérationnelle le 12 novembre 2001.

Les diagrammes ci-joint représentent les coupes altitude/latitude des biais du modèle dans le cycle d'assimilation (donc au plus près des observations) pour les périodes novembre-décembre 2000 et 2001. Les sources de différences dans le comportement d'Arpège entre ces deux périodes viennent du cumul des effets Cycora-bis (aspects thermodynamiques surtout, opérationnel depuis le 19 janvier 2001) et Cycora-ter. On constate une nette diminution de l'accélération des vents d'ouest aux latitudes 40-50°N et des alizés à 15°N et 20°S, ainsi que de moins grandes erreurs au sommet de l'atmosphère. La situation à la tropopause s'est, par contre, un peu dégradée.

Assimilation des données Atovs du satellite Noaa-16

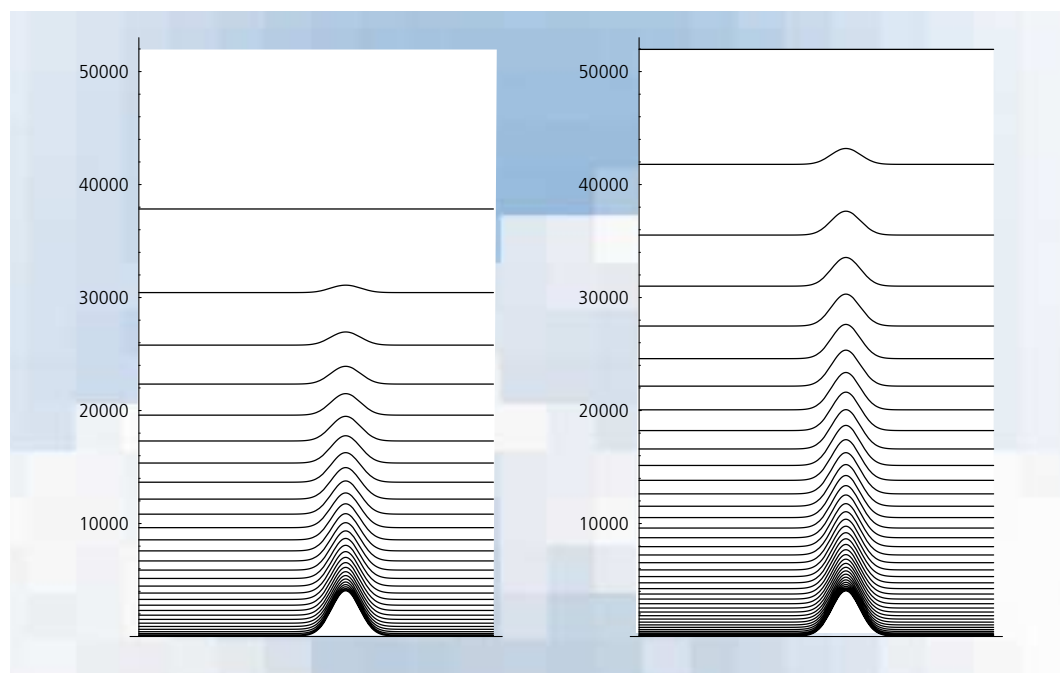
L'assimilation opérationnelle 4D-Var utilise les données des radiances pré-traitées Atovs provenant du satellite Noaa-15 de la Nesdis depuis juin 2000. Un deuxième satellite de type Atovs (Noaa-16) a été lancé fin 2000 et ses données sont assimilées depuis le 1er août 2001.

L'impact de ces données additionnelles par rapport à celles du seul satellite Noaa-15 sur la qualité de l'analyse et de la prévision a été testé en chaîne en double avant leur assimilation opérationnelle. Il a tout

d'abord fallu une période d'adaptation des procédures de débiaisage de ces nouvelles données, avant la stabilisation de la chaîne d'assimilation. Ensuite, sur une période de trois semaines, l'impact des données de Noaa-16 s'est révélé légèrement positif en moyenne, particulièrement dans la moyenne/haute troposphère sur l'Europe et l'hémisphère sud à échéance de 3/4 jours. Un apport significatif a également été noté à courte échéance sur la situation du 19 juillet 2001 (figure). D'autre part, l'assimilation expérimentale des données de radiances pré-traitées de Noaa-16 reçues et traitées localement au Centre de Météorologie Spatiale de Météo-France semble très prometteuse : les données, de bonne qualité, sont disponibles rapidement après l'heure de la mesure, ce qui garantit un nombre élevé de données injectées dans l'analyse.

Modèle global Arpège : une importante augmentation de résolution en vue

Un programme visant à augmenter globalement la résolution du modèle de prévision opérationnel Arpège a été mis sur pied en 2001. L'objectif est une augmentation uniforme de la résolution spectrale (horizontale) de 50% pour le modèle de prévision lui-même, et d'environ 70% pour les modèles d'assimilation (linéaire-tangent et adjoint). Il est à noter que la grille physique (dite de collocation) de ces modèles reste inchangée dans le premier cas, mais ce n'est pas elle qui conditionne la résolution horizontale effective.



La forte tempête tropicale Bako vue par le satellite Météosat 5 le 1^{er} décembre 2001 à 0 UTC. On a superposé en jaune le champ de pression analysé par la chaîne tropique. L'analyse de ce phénomène par le modèle Arpège Tropic est de 1000.8 hPa, contre 1006.5 à Arpège (non montré ici)

Parallèlement à cela, la maille verticale diminue d'environ un quart (donc la résolution verticale effective augmente d'environ un tiers puisque la discrétisation verticale est en différences finies), et le domaine est étendu verticalement de 5 hPa à 1 hPa.

Pour parvenir à ce triple but, il était d'abord nécessaire d'implanter dans le système des fonctionnalités nouvelles lui permettant de garder un niveau de fiabilité et d'efficacité identique au précédent.

Il s'est agit notamment : (I) du passage d'un mode de transport Eulérien à un mode semi-Lagrangien pour les modèles d'assimilation, afin de pouvoir utiliser des longs pas de temps dans cette partie du système, la plus contraignante en terme de coûts ; (II) de l'installation d'un processus modérateur pour empêcher une dérive excessive des champs aux très hauts niveaux dans le système d'assimilation, du fait du manque d'observations à ces niveaux ; (III) du réglage des paramétrisations physiques pour tenir compte du fait que de nouvelles échelles sont résolues. Ceci concerne en particulier les effets de turbulence et de calculs radiatifs.

Ce système avec augmentation de résolution fait l'objet d'une chaîne en double à partir du 20 novembre 2001, et après évaluation devrait conduire à un passage opérationnel en début 2002.

La première réunion des usagers MésO-NH

Le modèle MésO-NH (modèle communautaire de recherche, non-hydrostatique à méso-échelle) est né d'une collaboration entre Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique du CNRS. Mais la communauté des utilisateurs déborde maintenant largement ces deux organismes. Afin de faire dialoguer les différents usagers du modèle, la première réunion des utilisateurs MésO-NH s'est tenue au Centre de Conférences de Météo-France les 8 et 9 février 2001. Une quarantaine de chercheurs et ingénieurs (parfois étrangers), appartenant à huit laboratoires, ont participé activement à cette réunion. Celle-ci a permis d'une part de passer en revue les multiples utilisations scientifiques du modèle, et d'autre part de discuter des qualités ou défauts du code, de l'environnement informatique et de l'assistance aux usagers.

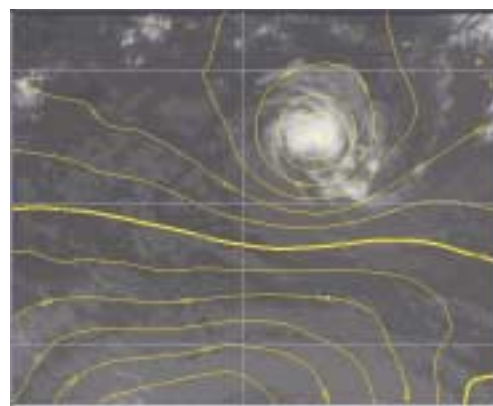
Les exposés ont été très divers : couche limite, chimie et transport atmosphérique, précipitations et nuages..., ce qui prouve la large gamme d'utilisations possibles du modèle MésO-NH.

Un ensemble de problèmes à corriger et d'améliorations à apporter a été répertorié. Certains ont déjà reçu une solution comme le comportement du schéma de turbulence 3D sur relief, l'intégration d'un nouveau schéma de rayonnement, ou le portage du modèle sur PC Linux. Les autres devraient être résolus au cours de l'année 2002.

Devant le succès et l'utilité de cette première édition, il a été décidé de renouveler ce type de rencontre tous les deux ans.

Des modèles pour les régions tropicales

Fin 2001, une nouvelle chaîne de prévision numérique baptisée "Chaîne Tropic" a été mise en opérationnel



à Toulouse. Cette chaîne, dédiée à la prévision en régions tropicales, est constituée du modèle Arpège Tropic et du modèle à aire limitée Aladin sur l'océan indien.

Le modèle spectral Arpège Tropic couvre la totalité du globe terrestre avec une résolution spatiale constante de l'ordre de soixante-cinq kilomètres ; il est lancé chaque jour, vers 3 heures UTC, pour effectuer des prévisions à 72 heures d'échéance. Dans un premier temps, le modèle Arpège Tropic dispose de la même physique qu'Arpège métropole ; à terme, les deux chaînes pourront diverger de manière à adapter la physique du modèle tropique à celle des phénomènes tropicaux et particulièrement des cyclones.

Pour la partie assimilation de données (4Dvar) Arpège Tropic assimile plus de données de vent, issues des satellites géostationnaires (SATOB), qu'Arpège métropole. Ceci permet d'améliorer la description de l'état initial de l'atmosphère, notamment sur l'hémisphère sud et les tropiques. Par ailleurs, un « bogus » est utilisé pour une meilleure prise en compte des systèmes dépressionnaires existants dans les régions tropicales (bogus : fausse observation élaborée par les experts prévisionnistes ; à la Réunion, le bogus est une valeur de la pression mer au centre du système dépressionnaire, établie à partir des images satellitaires, en utilisant la méthode de Dvorak).

Le modèle à aire limitée Aladin sera uniquement utilisé, lors de la première année, sur la partie sud-ouest de

l'Océan indien. Baptisé Aladin Réunion, il couvre la zone de responsabilité du CMRS de la Réunion. Sa résolution est de l'ordre de trente kilomètres.

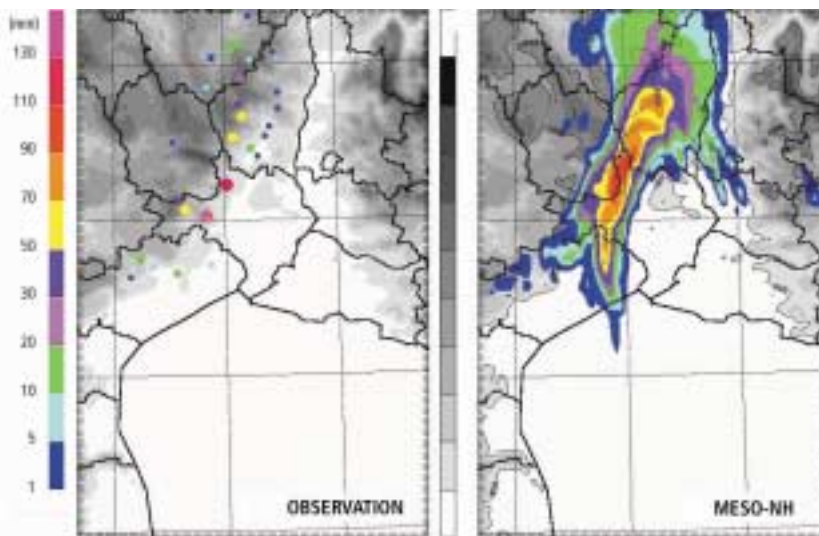
Modélisation des flux d'eau, de chaleur, et de CO₂ générés par les forêts

Les modèles utilisés en météorologie pour décrire l'interaction entre le sol, la végétation et l'atmosphère sont maintenant capables de prendre en compte la physiologie des plantes et de simuler les flux de CO₂. Les couverts forestiers doivent être traités différemment des cultures ou des prairies. En effet, les arbres ont une physiologie différente des plantes herbacées, en particulier pour ce qui est de la réponse à la sécheresse. En outre, une forêt peut être constituée de différentes couches de végétation de nature différente (présence d'un sous-bois herbacé par exemple).

Le modèle Isba-A-gs a été appliqué au cas de deux forêts françaises pour lesquelles un grand nombre d'observations ont été réalisées par l'INRA : la forêt des Landes (pin maritime) et la forêt de Hesse (hêtre). Une première étape a consisté à établir des règles de réponse au stress hydrique des paramètres de la photosynthèse des arbres à partir d'un grand nombre d'études publiées dans la littérature scientifique, à l'échelle de la feuille. Ces règles ont ensuite été introduites dans Isba-A-gs, qui calcule les flux pour l'ensemble du couvert. La transposition du comportement de feuilles isolées à l'ensemble du couvert est réalisée de manière très satisfaisante par le modèle, qui est capable de bien simuler les flux, comme le montre la comparaison avec les observations. Dans le cas de la forêt des Landes, on montre qu'il est nécessaire de prendre en compte de manière explicite la contribution du sous-bois herbacé, dont la physiologie est très différente de celle des pins.

Apport des observations de radars et de satellites dans un modèle de méso-échelle

Le succès d'une simulation atmosphérique tient à la capacité du modèle numérique à représenter les processus impliqués dans le phénomène étudié, et à la qualité des conditions initiales. Celles-ci sont généralement fournies par des analyses issues de systèmes d'assimilation de grande échelle. Elles ne



contiennent pas nécessairement toute l'information de méso-échelle cruciale pour l'obtention de simulations de qualité, à haute résolution (2-3km).

C'est pourquoi les chercheurs de Météo-France ont cherché à insérer par des méthodes combinant interpolation optimale, ajustement et relaxation Newtonienne, ce type d'informations sur la base des observations disponibles à une fréquence spatio-temporelle compatible avec l'échelle concernée. Les réflectivités radar du réseau Aramis, les données du satellite Météosat et les observations de surface à fréquence horaire répondent à ces critères. Ces dernières modifient les basses couches de l'atmosphère, alors que les deux autres introduisent une information sur la présence de nuages et de précipitations.

Deux méthodes ont été testées : insertion des nouvelles observations à un instant donné, ou rappel des champs du modèle vers les valeurs observées pendant une courte période en début de prévision. Les tests ont porté sur des cas de convection en plaine au sein d'un environnement relativement sec et sur des cas de systèmes convectifs quasi-stationnaires sur le Massif Central, qui se développent dans un environnement plus humide.

Les deux méthodes d'initialisation améliorent significativement les résultats des simulations à haute résolution du modèle Meso-NH par rapport à ceux obtenus à partir des analyses opérationnelles Arpège ou Cephmt. Les résultats montrent un plus fort impact des données de radar et satellite sur les cas de plaine.

Cumul de précipitation observé et simulé de 21 UTC à 06 UTC pour le système convectif quasi-stationnaire des 13-14 octobre 1995 sur la région Cévennes-Vivaraïs. Le maximum de précipitations obtenu après modification des conditions initiales est 4 fois plus important que celui atteint dans la simulation ayant pour conditions initiales une analyse de grande échelle.

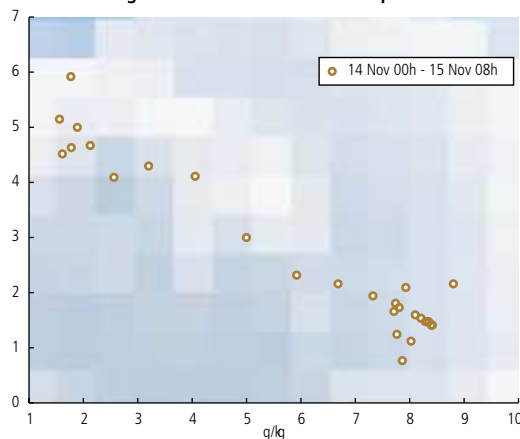
PROCESSUS ATMOSPHÉRIQUES

Pierre angulaire de l'amélioration de la compréhension et de la prévision des phénomènes météorologiques et climatiques, l'étude des processus atmosphériques s'appuie à la fois sur l'investigation expérimentale et sur l'utilisation comme "laboratoires numériques" des modèles informatiques.

Définition et préparation d'un nouveau programme d'étude de la Mousson Africaine

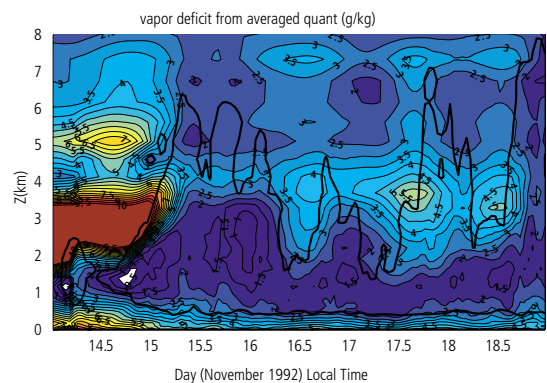
Depuis quelques années, Météo-France s'est fortement engagé dans la définition d'un programme d'étude de la mousson sur l'Afrique de l'Ouest, pour rassembler et faire interagir différentes communautés (atmosphère, chimie atmosphérique, biosphère, hydrosphère et surface océanique). Ce système de mousson est entré depuis les années 70 dans un régime de précipitations nettement déficitaires, et s'avère extrêmement sensible à l'état des surfaces continentales et à leur dégradation. Ce programme fédérateur a obtenu un soutien des organismes français de recherches (Cnrs, IRD, Cnes, Météo-France) à la hauteur de la complexité du système multi-échelles et multi-processus étudié. La phase préparatoire au niveau français s'est traduite par la diffusion du "Livre Blanc" du projet. Nous engageons maintenant la phase d'organisation du projet au niveau international, couplée à une intense activité de préparation scientifique du projet.

Sommet Nuages en fonction du déficit en vapeur entre 1.43k



Les intrusions d'air sec sur l'océan Pacifique équatorial

L'expérience Toga-Coare, sur la zone tropicale ouest de l'Océan Pacifique, a mis en évidence l'occurrence fréquente d'arrivée d'air sec dans la moyenne et basse troposphère, en provenance des plus hautes latitudes. Ces « intrusions d'air sec » ont un double impact : le maintien d'inversions thermiques par effets radiatifs associés aux fortes discontinuités de stratification de l'humidité, et un effet de résorption des cellules convectives pénétrant ces couches sèches. Suite à un tel événement, on note une forte inhibition de l'activité convective pendant plusieurs jours, et un stockage important d'énergie dans la couche limite qui permettra ultérieurement une violente période convective. Ce mécanisme semble jouer un rôle important dans la variabilité intra-saisonnière de la convection, par exemple l'oscillation de Madden-Julian.



Les chercheurs de Météo-France ont étudié ces mécanismes à l'aide de simulations numériques explicites des nuages, lors d'un événement observé pendant la campagne Toga-Coare. Ils ont montré que la hauteur de la couche convective était inversement proportionnelle au déficit de vapeur d'eau de ces couches par rapport à la saturation : il semble donc nécessaire de prendre en compte ce facteur d'inhibition dans les paramétrisations de la convection. Concernant l'origine des intrusions, ils ont montré qu'elles étaient connectées aux oscillations des jets sub-tropicaux pour la région du Pacifique concernée. De telles intrusions ont également été détectées sur le nord de l'Afrique, ce qui pourrait être un facteur de modulation intra-saisonnière de la mousson africaine. L'explication de leur origine, située aux moyennes latitudes, est l'objet des travaux actuels.

Le projet Eurocs

Le cycle diurne de la convection profonde est un mode d'organisation temporel particulièrement marqué sur les continents. La convection profonde s'y développe préférentiellement en fin d'après-midi, en étroite

relation avec le cycle diurne de la surface et de la couche limite atmosphérique. Cette organisation temporelle affecte profondément le cycle hydrologique et le bilan radiatif, via les pluies et les nuages associés à ces processus. La plupart des modèles de climat n'arrivent pas à reproduire ce cycle, qui fait intervenir de nombreux processus paramétrés (convection humide, turbulence, processus de surface). Typiquement, la convection profonde simulée par les modèles de climat (ex : orages d'été) est en avance de plusieurs heures.

Dans le cadre du projet européen Eurocs, coordonné par Météo-France, on aborde l'étude de ce phénomène à l'aide d'une hiérarchie de huit modèles, allant des modèles explicites de nuages aux modèles de climat, en passant par des versions uni-colonne de ces derniers.

Un cas d'étude idéalisé, basé sur des données de l'expérience américaine Atmospheric Radiation Measurement, a été mis au point pour tester les modèles uni-colonne et les confronter aux résultats de modèles explicites de nuages. Néanmoins, des études de sensibilité montrent que ces résultats sont encore trop sensibles au traitement de la couche limite atmosphérique, un domaine en cours d'exploration. Parallèlement, les mécanismes responsables du déclenchement de la convection et leur relation avec le cycle diurne de la stabilité atmosphérique sont en cours d'analyse, tant dans les modèles explicites que uni-colonne.

Impact de l'analyse des nuages sur une simulation de MésO-NH

Un des objectifs du programme Map est d'essayer de faire progresser la précision de la prévision des précipitations intenses, à la fois dans l'espace et dans le temps. Cette amélioration peut-être le fruit d'une nouvelle génération de modèles numériques, mais peut aussi venir de l'utilisation de données nouvelles. L'information "nuage", accessible par le radar et le satellite, non utilisée jusqu'à aujourd'hui, est un candidat potentiellement intéressant parmi d'autres.

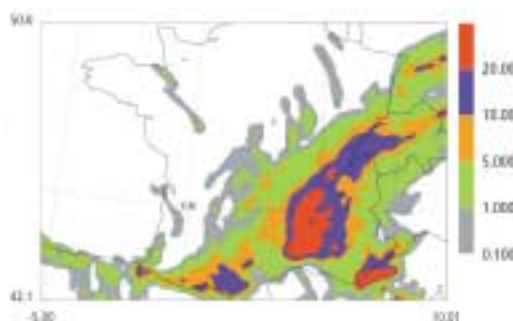
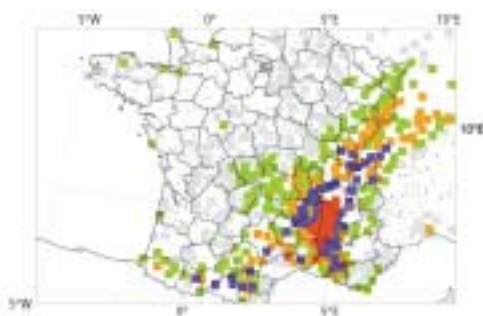
A partir de la mosaïque radar européenne et de la classification nuageuse Meteosat opérationnellement produite par Météo-France, des pseudo-observations de profil d'humidité sont produites : on impose une valeur proche de la saturation dans le nuage et une faible valeur dans les zones claires autour et au dessus des nuages.

Pour un cas d'observation intensive lors de la campagne Map (02/11/99) ces profils ont été assimilés par le code d'interpolation optimale Canari/Diagpack. Les données de surface (température, humidité, vent et pression) du réseau Radome de Météo-France ont été aussi prises en compte. Partant de cette analyse, des simulations numériques ont été effectuées avec le modèle MésO-NH. Les cumuls de précipitations sur 6 heures, simulées à la résolution de 10 km, en partant d'une analyse de référence, ou bien de celle modifiée par la prise en compte des données pré-citées, ont été comparés aux mesures réalisées pendant la campagne de mesures Map. Un net impact positif de l'insertion des données issues de satellite, quantifié par des scores objectifs, a été mis en évidence pour la courte échéance (6 à 18h).

La méthode est en cours d'évaluation pour un orage violent sur les Pyrénées Orientales associé à de fortes chutes de grêle (21/04/99) et donne des résultats encourageants.

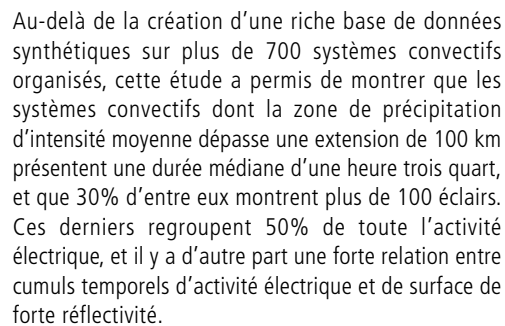
Vers une climatologie objective des systèmes convectifs organisés

Les orages peuvent s'organiser en systèmes, telle la ligne de grains plus ou moins nette, l'amas, ou prendre la forme de super-cellules. Les comportements et impacts types de ces divers objets sont très différents. On ne dispose pas aujourd'hui d'une climatologie objective de ces diverses organisations en France. Le travail récemment mené en ce sens consiste en la mise au point d'une méthodologie pour une exploitation systématique de l'archive d'imagerie radar du réseau Aramis de Météo-France, combinée avec les données d'éclairs du réseau Météo-France/Météorage, et a déjà apporté quelques résultats pour les plus gros systèmes, à l'échelle d'une année de données.



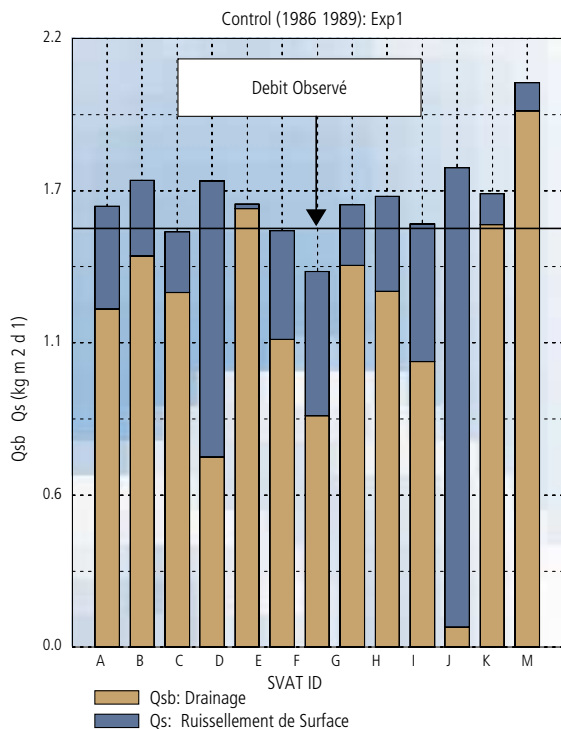
Précipitations observées cumulées sur 6 heures du 2/11/99 18 UTC au 3/11/99 00 UTC (à gauche) ; même champ simulé par le modèle MésO-NH partant d'une analyse du Cephmt modifiée par la prise en compte de la classification nuageuse, de la mosaïque radar européenne et du réseau Radome (à droite)

Anticipation du premier éclair d'un système convectif par la surveillance du taux de refroidissement des nuages. Le graphe représente les différents compromis entre taux de bonnes détections et de fausses alertes pour différents seuils de refroidissement (ces quantités sont définies comme le rapport du nombre de cas où les éclairs sont diagnostiqués au nombre total de cas où un nuage en cours de refroidissement existe, et où des éclairs ont été (ou n'ont pas été) observés). Les valeurs médianes de délai d'anticipation en résultant sont indiquées en rouge (valeurs en minutes). On a ici utilisé les données du satellite Goes



Pour la prévision immédiate des systèmes orageux, les chercheurs de Météo-France ont développé une méthode automatique d'association des éclairs nuage-sol aux enclumes nuageuses diagnostiquées et suivies par le système "Isis". Cette méthode est basée sur l'exploitation de l'imagerie infrarouge de satellites géostationnaires ; elle décrit bien les tous premiers instants de développement des systèmes orageux, et a permis d'évaluer la capacité des données de satellite à anticiper la date du premier éclair, par un critère basé sur le taux de refroidissement du nuage, dans le cadre d'un système automatique.

Les premiers résultats ont pu être discutés lors d'un atelier tenu à Toulouse (5-6 décembre 2001). Un autre ensemble de simulations était destiné à examiner les



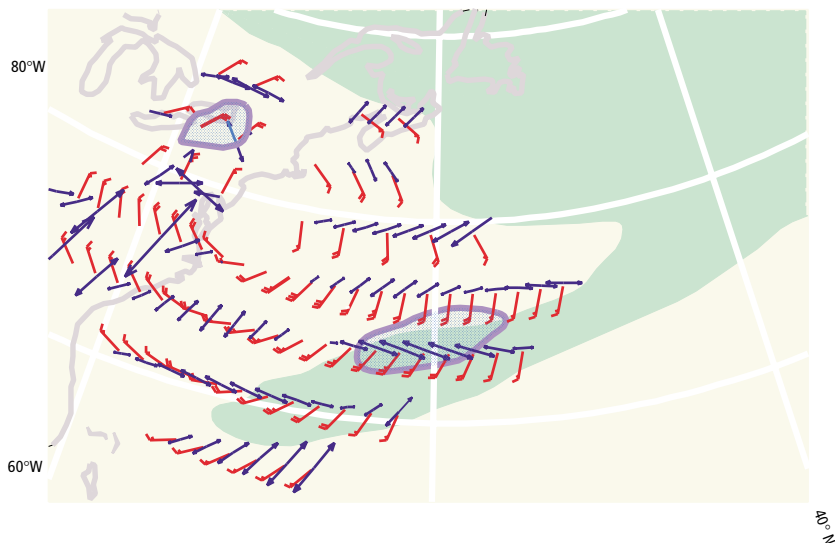
performances hydrologiques des schémas de surface lorsque la maille de calcul est augmentée progressivement de 8 km jusqu'à la taille de la maille d'un Modèle de circulation générale. Dans le cas de la résolution la plus forte (8 km), deux types de paramétrisations apparaissent critiques pour une bonne simulation des débits : la prise en compte du ruissellement sous maille et la représentation spécifique du manteau neigeux dépendant de l'altitude. A faible résolution, la plupart des schémas sous-estiment le ruissellement de surface et accélèrent la disparition du manteau neigeux, à l'exception d'un seul schéma capable de décrire la distribution verticale des précipitations et de la température suivant la topographie sous-maille. Par ailleurs, la prise en compte de la variabilité sous-maille de la végétation (paramètres effectifs ou approche mosaïque) s'avère beaucoup plus performante que la méthode simple basée sur les paramètres dominants dans la maille.

Valorisation de la campagne Fastex : un cas non classique de cyclogénèse

Cette question est abordée dans le cas de cyclogénèse observé pendant la campagne de mesures Fastex le 17/02/97. Comme on le voit fréquemment sur l'Atlantique, une nouvelle dépression naît le long d'une zone de contraste thermique marqué associée à un vieux front froid. Le long de cette région de contraste thermique subsiste du vent (la bande verte allongée sur la figure). Dans le cas étudié, on cherche à savoir pourquoi la dépression naît précisément par 60° de

longitude Ouest et 34° de latitude Nord, et pas ailleurs le long du front. Les théories d'instabilité existantes ne s'appliquent pas bien dans ce genre de situation puisqu'elles sont établies à partir d'écoulements atmosphériques simplifiés trop idéalisés. En passant outre cette difficulté, elles pourraient nous indiquer le caractère stable ou instable du front, mais, en aucun cas, la position précise du déclenchement de la cyclogénèse. Or ici, une perturbation initiale de vent (barbules en rouge sur la figure) associée à une autre dépression située au large des Etats-Unis affecte la zone de naissance de la dépression dont on cherche à expliquer l'apparition.

Cette perturbation initiale croît ensuite par interaction avec la zone frontale selon un mécanisme dit barotrope. Elle puise son énergie du réservoir d'énergie cinétique constitué par le vent du front (les régions vertes sur la figure) là où la perturbation de vent est orthogonale à l'étirement (les flèches bleues) provoqué par le cisaillement horizontal du vent du front. Une telle configuration optimale existe le long du front : il s'agit de la région de conversion énergétique maximale repérée par le contour mauve.



Le modèle conceptuel présenté ci-dessus et fondé sur des mécanismes physiques peut s'appliquer à une grande diversité d'écoulements atmosphériques.

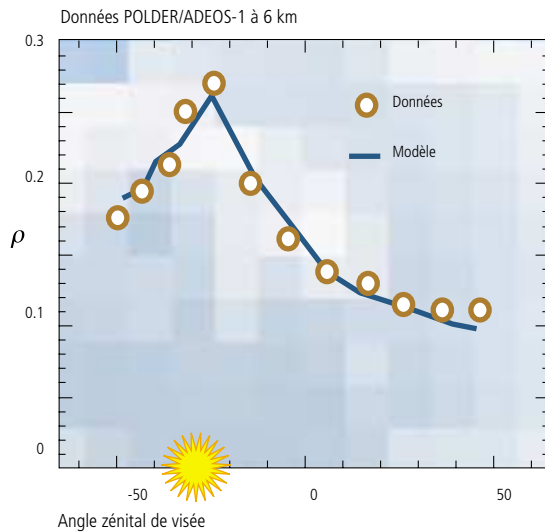
Transfert radiatif dans la végétation : le modèle Ghost et l'expérience Ematref

Le modèle Ghost gère le transfert du rayonnement solaire dans un couvert végétal par une expression analytique simple. Il a été développé pour étudier les mécanismes radiatifs complexes des forêts boréales, mais peut s'appliquer à tous les écosystèmes continen-

Comparaison du ruissellement total calculé sur le bassin du Rhône par les 16 schémas de surface. La répartition du ruissellement total en ruissellement de surface et drainage est indiquée dans chaque cas. La droite horizontale représente le débit annuel moyen du Rhône à Beaucaire

Eléments clés au moment de la naissance d'une nouvelle dépression le long du front le 17 février à 06 UTC. En rouge : vent à 900 hPa associé à une ancienne dépression au large des Etats-Unis (1 petite barbule pour 5 nœuds, 1 grande barbule pour 10 nœuds). La région verte représente le réservoir d'énergie cinétique dans laquelle la nouvelle perturbation pourra puiser

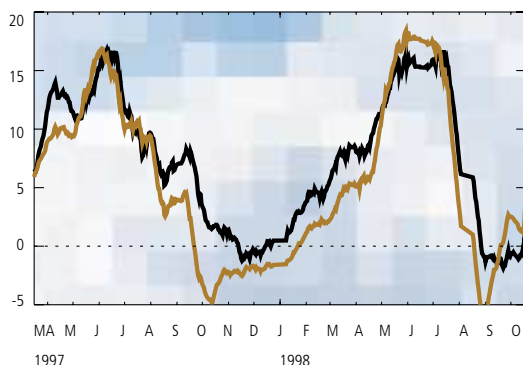
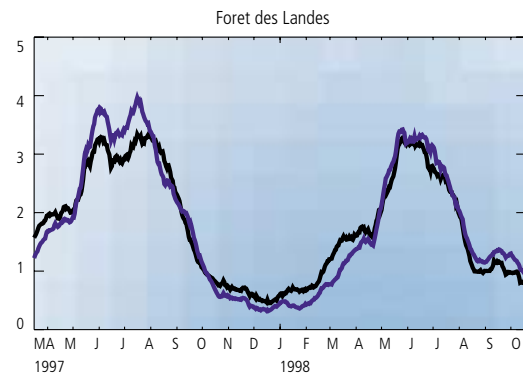
Comparaison des réflectances infra-rouge mesurées par Polder et modélisées avec Ghost pour une forêt de conifères dans le plan azimutal contenant la cible et le soleil. Le maximum de réflectance pour la direction solaire est dû au "hot spot"



taux. La formulation de Ghost est suffisamment générique pour décrire l'essentiel du transfert radiatif dans un couvert discontinu, à des résolutions spatiales comprises entre quelques mètres et plusieurs kilomètres. Les paramètres restitués par l'inversion du modèle à partir de données télédétections sont l'indice foliaire, l'albédo de diffusion simple, la densité et la rugosité du couvert végétal.

Une particularité de Ghost est sa capacité à simuler la signature angulaire du "hot spot". Celui-ci correspond à un maximum de réflectance mesuré dans la direction d'éclairement, dû à l'absence d'ombres observables

À gauche : Simulation de l'équivalent en eau du manteau neigeux sur le site du Weissfluhjoch (2540 m, Suisse). Les modèles de neige ont été forcés par les données météorologiques observées sur ce site. Les observations sont représentées sur le graphique par des points noirs



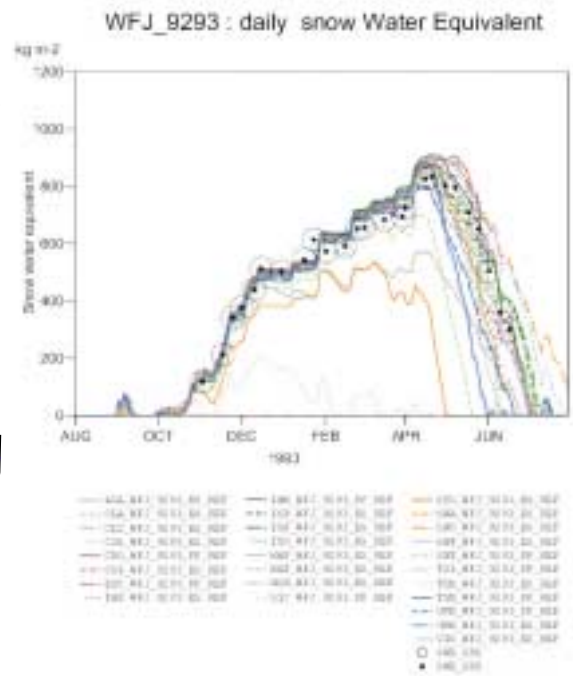
Comparaison des mesures effectuées avec le capteur Polder sur la forêt des Landes (conifères) et reproduit par le modèle Ghost

(figure). L'amplitude et la largeur du "hot spot" sont fonction de l'architecture du couvert. L'inversion de Ghost permet de restituer des paramètres structuraux du couvert végétal qui servent à mieux discriminer les surfaces, améliorer les classifications, et obtenir des facteurs de changement d'échelle.

Le volet expérimental de ce travail est le programme Ematref, mené en partenariat avec l'INRA. Il consiste à réaliser au dessus de la forêt des Landes des mesures aéroportées avec le radiomètre Polder, en configuration de "hot spot" et pour des positions variées du soleil, afin d'observer finement toutes les strates de la forêt. Des campagnes sur le terrain permettront d'acquérir parallèlement des mesures in situ de surface foliaire, de rayonnement solaire au sein du couvert végétal, et d'épaisseur optique des aérosols sur deux sites de la forêt des Landes.

Une intercomparaison de modèles de neige.

La modélisation du manteau neigeux a des applications diverses : hydrologie, modélisation du système climatique, prévision du risque d'avalanches, recherches plus fondamentales sur la structure de la



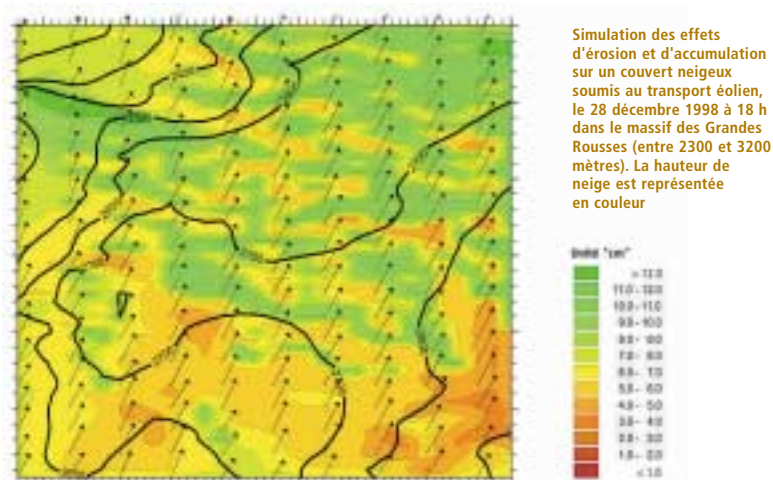
neige... Le CNRM ayant un savoir faire dans la plupart de ces domaines a proposé l'organisation d'une intercomparaison de modèles de neige : Snowmip (Snow models intercomparison project). Cette initiative est soutenue par la commission internationale sur la neige et les glaciers de l'Association internationale

des sciences hydrologiques, le groupe de travail sur les expérimentations numériques de l'OMM et le PNRH français. Quatre sites ont été sélectionnés : Col de Porte (France), Weissfluhjoch (Suisse), Goose Bay (Canada), et Sleepers River (Etats-Unis). Les participants (une vingtaine d'équipes dont certaines présentent plusieurs modèles) ont effectué différentes simulations sur les quatre sites. Un atelier "SnowMIP" a été tenu à Innsbruck lors de l'assemblée générale de l'Association internationale des sciences météorologiques et atmosphériques.

Une première analyse des résultats reçus a été effectuée à cette occasion. Elle a porté essentiellement sur les simulations des hauteurs de neige et d'équivalent en eau du manteau neigeux. La concordance entre les modèles est plutôt bonne sur certains sites, alors que dans d'autres cas la dispersion des simulations est importante. De plus, cette analyse ne met pas nettement en évidence de relations entre niveau de détail du modèle et qualité de la simulation. Cette analyse préliminaire sera complétée en 2002 par d'autres comparaisons portant sur le bilan énergétique, le bilan hydrologique et l'état interne du manteau neigeux.

Simulation numérique du transport de la neige par le vent

Le transport de neige par le vent pose de nombreux problèmes, que ce soit dans un contexte "haute-montagne" avec la formation de corniches et de plaques à vent, ou dans des contextes "gestion" ou "protection" d'ouvrages dans des situations de neige soufflée. L'amélioration de la prise en compte de ces risques, et plus spécialement de ceux concernant le déclenchement accidentel d'avalanches dans la prévision opérationnelle, nécessite une meilleure



connaissance des effets du vent sur la répartition du couvert neigeux et sur sa stabilité. Les difficultés rencontrées concernent principalement l'échelle très fine, quelques centaines de mètres, de ces phénomènes, laquelle impose de représenter aussi précisément que possible la répartition du vent et l'état complet du couvert neigeux dans un environnement montagneux réaliste.

Après plus de 10 années de campagnes de mesures sur un site instrumenté d'altitude, spécialement dédié à cette problématique, Météo-France a développé plusieurs outils numériques qui sont actuellement en cours de validation. Ces nouveaux modules (Samver et Sytron) complètent les applications opérationnelles actuelles de plus grande échelle, dans lesquelles les effets de transport sont faiblement intégrés. Ils permettent ainsi, comme représenté sur la figure jointe où la hauteur de neige totale est représentée en plages de couleurs, de simuler les principaux effets d'érosion ou d'accumulation sur un couvert neigeux soumis à un phénomène de transport éolien.

CAMPAGNES EXPÉRIMENTALES

Au plan des campagnes de terrain, "Escompte" et "Pomme" ont été les vedettes de l'année 2001, cependant que se poursuivait activement, comme il se doit, l'exploitation des campagnes du passé récent, en particulier de MAP.

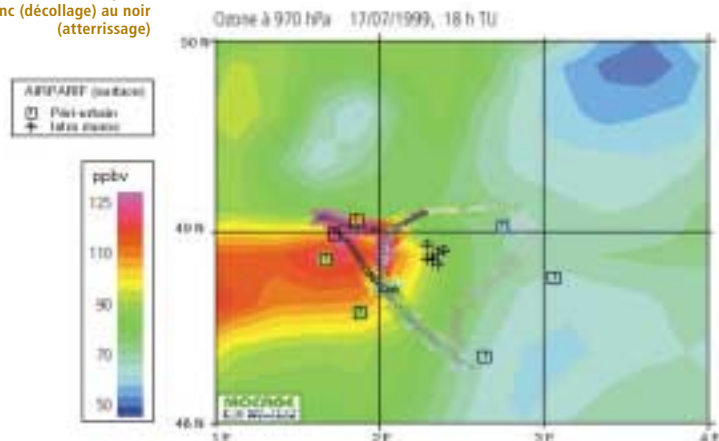
Simulations photochimiques de la campagne Esquif

Le programme Esquif (Etude et Simulation de la QUalité de l'air en Ile de France) a été consacré à l'étude des processus chimiques et dynamiques conduisant à des épisodes de forte pollution atmosphérique en région parisienne. Coordonné par l'Institut Pierre-Simon Laplace, Esquif s'est déroulé sur plus de deux années. Une douzaine d'épisodes ont été documentés à la fois à l'aide de moyens de mesures en surface et aéroportés, avec une contribution significative de Météo-France. L'ensemble des observations recueillies sert de base à l'évaluation et à la confrontation des modèles numériques déterministes de la communauté nationale.

Quatre épisodes de pollution photo-oxydante de l'été 1999 ont ainsi été simulés avec le modèle Mocage de Météo-France, à une résolution horizontale de 25 km. De manière générale, les concentrations d'ozone sont fidèlement reproduites, ainsi que l'intensité des panaches sous le vent de Paris. Les simulations ne présentent pas de biais significatif par rapport aux observations, sauf dans le cas des stations urbaines que la résolution utilisée ne permet pas de représenter.

Sur la colline du Vallon Dol qui surplombe Marseille, recueil des données de la station météo installée pour l'expérience Escompte

Exemple de confrontation d'une simulation d'ozone de Mocage avec des mesures aéroportées et des stations de surface du réseau Airparif. Le même code de couleur est adopté pour la simulation et les observations, marquées par des croix pour les mesures aéroportées et des signes pour les stations au sol ; le marqueur des positions successives de l'avion passe du blanc (décollage) au noir (atterrissage)



La confrontation d'une simulation d'ozone de Mocage avec des mesures aéroportées et des stations de surface du réseau Airparif (figure) montre une représentation correcte de l'intensité du panache d'ozone de Paris. Un léger décalage spatial est toutefois constaté, indiquant que la qualité de la simulation des champs de polluants est notamment tributaire de celle du vent.

La campagne Escompte

Animé par le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, l'Ademe, le CNRS/INSU et Météo-France, le programme Escompte étudie les processus dynamiques et chimiques conduisant aux niveaux de pollution photochimique (épisodes d'ozone) observés à l'échelle régionale pendant la période estivale.



Son terrain : une zone d'une centaine de kilomètres autour de Berre-Marseille, riche en sources de pollution industrielle (complexe de Fos-Berre) et urbaine (agglomération marseillaise), en émissions de composés organiques volatils par la végétation méditerranéenne, et siège de mécanismes dynamiques complexes (transition terre-mer sur une côte tortueuse donnant lieu à des cycles de brise, canalisation par les reliefs des circulations de méso-échelle).

Après les études préparatoires, numériques et sur le terrain, de 1999 et 2000, le point d'orgue était placé du 5 juin au 13 juillet 2001, avec 7 avions de recherche, des ballons quasi-lagrangiens pour suivre à basse altitude les panaches de pollution, 8 radars, 7 sodars et un lidar pour la mesure du vent, 5 lidars pour la mesure de l'ozone, 4 radiosondages, une vingtaine de sites de mesures de surface, deux navires équipés pour la mesure de la composition chimique de l'air sur la Méditerranée, une cellule de coordination dans les locaux de la DIRSE à Aix-en-Provence, l'assistance météorologique du CDM 13, et au total une centaine de personnes en permanence sur le terrain (appartenant à environ 70 équipes originaires de 6 pays).

La période choisie s'est en définitive révélée particulièrement favorable aux objectifs visés, puisque 5 épisodes intéressants ont pu être documentés. Particulièrement remarquable par des températures et des niveaux de pollution très élevés, la situation du 23 au 26 juin notamment devrait devenir une situation de référence dans la communauté des spécialistes de la pollution atmosphérique.

Le lidar Doppler aéroporté Wind pendant la campagne Escompte

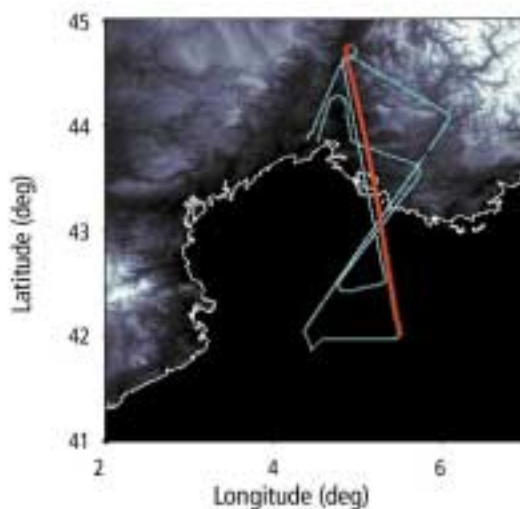
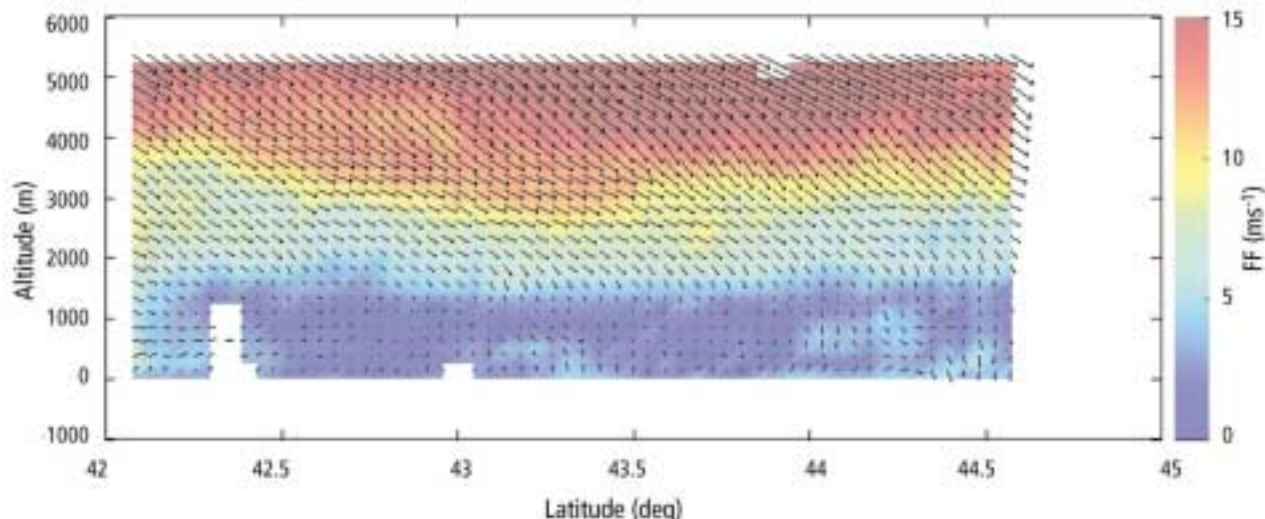
Escompte était le grand rendez-vous de l'année 2001 pour le lidar Doppler aéroporté franco-allemand Wind (Cnes/Cnrs/Dlr). Dédicée à l'observation de la pollution en région marseillaise, la campagne était particulièrement favorable au lidar à cause de la forte réflectivité attendue des masses d'air polluées. Les attentes n'ont pas été déçues. Les données acquises pendant les sept vols scientifiques de la campagne ont permis de restituer le long des trajectoires des profils verticaux

précis de vent horizontal précis (à 0.5 ms⁻¹). Une dizaine d'heures de vol étaient financées par le programme européen Caater, le reste par le projet Escompte.

La figure contient les profils mesurés le 25 juin en fin d'après-midi. La trajectoire du jour est indiquée par une ligne bleue sur la carte. La figure concerne la portion rouge. Sur le graphique principal, la direction des flèches est celle du vent horizontal mesuré, et leur longueur est proportionnelle à la force. L'information « force » est reprise par le fonds de couleur selon l'échelle de droite. Au dessous de 1500 mètres, le vent ne dépasse guère 5 m.s⁻¹. Des circulations cohérentes apparaissent malgré tout, en particulier entre 43° et 43.5° où l'on remarquera un flux de sud caractéristique de la brise de mer. Celle-ci pénètre à l'intérieur des terres, mais sa progression est contrariée par un flux de Nord en provenance de la vallée du Rhône. Celui-ci est probablement le fruit d'une canalisation du vent synoptique par la vallée.

Escompte

25 - Jun - 2001 - 16:43:46 to 17:17:21 UTC



Profils verticaux du vent horizontal mesurés par le lidar Doppler aéroporté Wind le 25 juin 2001 pendant la campagne Escompte. La position géographique des profils est repérée par la latitude. Pour la longitude, il faut se référer à la carte sur laquelle on a représenté la trajectoire (en bleu) et la portion de celle-ci le long de laquelle les vents ont été observés.

Etude de la Couche Limite Urbaine lors de la campagne Escompte

La connaissance des propriétés de l'écoulement de basses couches en zone urbaine est un pré-requis pour l'étude de la pollution urbaine. Dans le cadre de la campagne de mesures Escompte (qui a pour but d'étudier les épisodes de pollution photochimique), Météo-France a conduit une campagne de mesure sur divers sites de l'agglomération de Marseille, afin d'étudier d'une part le comportement des surfaces urbaines, d'autre part l'impact de celles-ci sur l'atmosphère, en particulier la Couche Limite Urbaine.

Le site central d'Escompte-Couche limite Urbaine a été établi dans le centre-ville historique de Marseille. Grâce à la collaboration d'équipes canadiennes et américaines, un mât de 30m a été instrumenté à partir d'un toit situé déjà à 20m au dessus des rues (figure), ainsi que quelques sites annexes de mesures de température de surface des parois. Les mesures effectuées sur le mât à 2 niveaux différents ont permis (i) de documenter pendant un mois les bilans d'énergie spécifiques au bâti urbain, (ii) de vérifier la très bonne qualité de ces données, puisqu'elles sont bien dans la couche "à flux constant", les 2 mesures étant absolument concordantes.

Enfin, des simulations préparatoires du modèle Mésos-NH (à 250m de résolution) sur Marseille ont aussi permis l'optimisation de l'emplacement de 20 stations de mesures de température et d'humidité déployées pour décrire la forme et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain, en relation avec la brise de mer.

Exploration du diagramme des régimes d'écoulements secs et humides sur des Alpes idéalisées

En 2001, une série de simulations numériques à haute résolution a été conduite afin d'explorer les divers régimes d'écoulements sur un massif montagneux simplifié, de la taille des Alpes. Cette démarche prélimi-

naire est utile pour isoler les divers mécanismes à l'œuvre dans le cas réel de la campagne de mesures Map, beaucoup plus complexe à interpréter du fait des multiples échelles spatiales et temporelles présentes.

Les Alpes ont été remplacées par une montagne régulière en forme d'arc, l'atmosphère a été supposée homogène horizontalement, et ses caractéristiques données par un radiosondage issu de la campagne Map. Les phénomènes visés par cette étude sont les mécanismes de déclenchement et de maintien de la convection violente sur les Alpes.

L'objectif du premier jeu de simulations a été de chercher la solution stationnaire grâce au modèle non-hydrostatique Mésos-NH avec une maille de 10 km, en négligeant tous les phénomènes liés aux nuages. Ces expériences ont permis de montrer, en faisant varier le vent à chaque expérience, comment les écoulements à des échelles de l'ordre de 100 km sont contrôlés par la hauteur de la montagne et par la rotation terrestre.

L'activation des changements de phases de l'eau a permis de déclencher la convection quand le forçage était suffisant, soit par un paramétrage (pour les simulations à maille 10 km), soit de façon explicite (pour les simulations à 2.5 km). L'étude de ces deux hypothèses (figure) montre que le paramétrage de la convection ne simule que de façon approximative la localisation et l'intensité de la pluie sur les pentes de la montagne. Par contre, on constate que les régimes d'écoulement observés restent sensiblement les mêmes que pour le cas sec.

Simulation d'un cas de fortes précipitations lors de la campagne Map

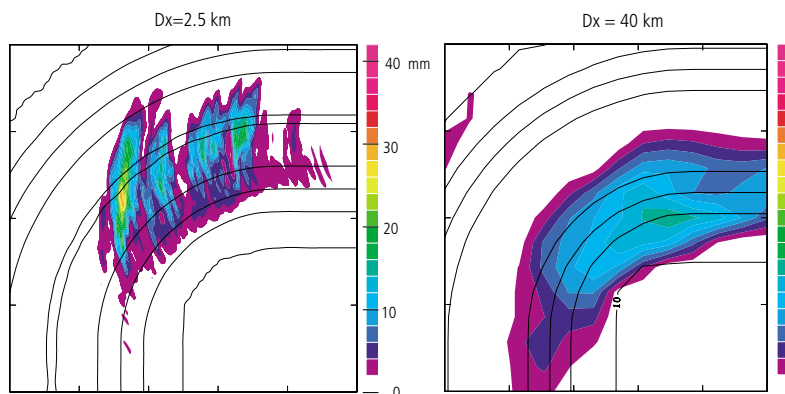
Pendant la campagne Map, la période d'observation des 19 et 20 septembre 1999 fut la plus intense en terme de précipitations, avec des maxima supérieurs à 300 l/m² en 24 heures. La zone cible du Lac Majeur en Italie correspond bien au maximum des précipitations de cette situation. A partir des nombreuses observations radars, des mesures de surface et des vols d'avions de recherche effectués durant ces deux jours, une validation des simulations à échelle fine du modèle Mésos-Nh a été entreprise. Elle montre une très grande sensibilité aux structures d'humidité présentes sur la mer Méditerranée. Ces structures déterminent la chronologie des pluies convectives sur les Alpes, mais sont encore mal représentées. La simulation des événements observés à l'échelle horaire reste donc difficilement accessible.

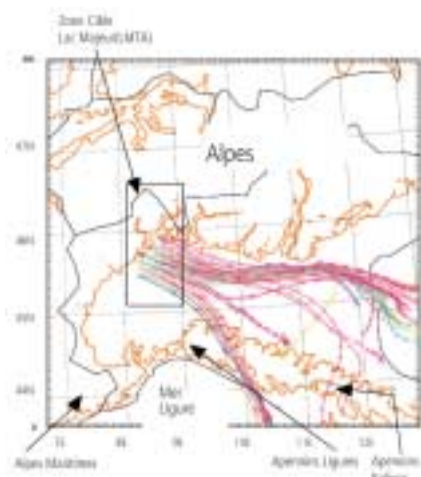
Par contre, l'évolution des événements majeurs (fronts, jets, localisation de la convection) et les cumuls de précipitations sur 24 heures sont conformes aux observations. L'intensité de la pluie sur le Lac Majeur

Pluie cumulée pendant 3 heures (en mm), dans des expériences idéalisées d'écoulements sur les Alpes :

a) à gauche, simulation avec pluie explicite (maille 2.5 km) ;

b) à droite simulation avec pluie paramétrée (maille 10 km)



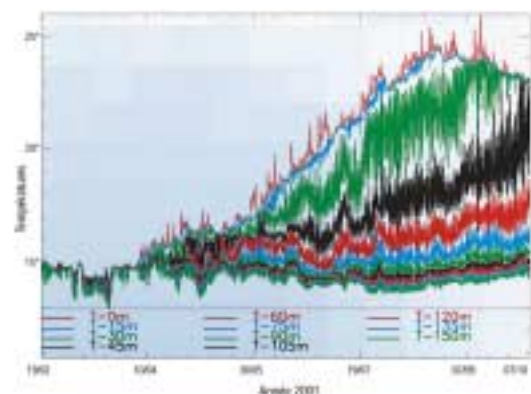


est fortement corrélée à l'intensité du vent d'est, qui souffle dans les basses couches de la plaine du Pô perpendiculairement aux principaux reliefs (figure). Les fortes valeurs de Cape (Convective Available Potential Energy) présentes en Mer Méditerranée et Mer Ligure génèrent de fortes pluies sur les Alpes Maritimes et les Apennins Ligures à l'avant du front froid. L'air des basses couches de la plaine du Pô a deux origines très différentes : un flux d'est qui apporte de l'air Adriatique humide, et un flux de sud, qui franchit les Apennins Italiens en y créant des pluies convectives avant de redescendre asséché sur le Pô (figure). Ainsi les Apennins Ligures jouent un rôle majeur de séparateur des couches limites maritimes et de la plaine du Pô, protégeant le Lac Majeur de précipitations encore plus violentes.

La campagne Pomme

La campagne Pomme visait à étudier le cycle annuel du carbone et le rôle de la méso-échelle océanique dans la subduction des eaux modales du proche Atlantique. Elle s'est déployée sur une zone centrée autour de 18°W et 41°N entre l'automne 2000 et l'automne 2001.

Météo-France était particulièrement impliqué pour les périodes d'observation correspondant à l'étude de la floraison printanière, situées entre février et mai 2001. Un mât instrumenté de onze mètres était installé sur



le navire océanographique l'Atalante de l'Ifremer, afin de mesurer les échanges entre l'océan et l'atmosphère à l'échelle turbulente. Pour assurer le suivi de ce dispositif et réaliser quotidiennement deux sondages verticaux de l'atmosphère, trois personnes de Météo-France ont embarqué sur l'Atalante avec pour objectif de mesurer le plus précisément possible les quantités d'énergie échangées entre l'océan et l'atmosphère. Avec 95 jours de données quasi-ininterrompues cet objectif est atteint.

Parallèlement à ce dispositif, un nouveau système était mis en œuvre. Basé sur une méthode de prélèvement sélectif d'échantillons, il a permis d'analyser chaque demi-heure les teneurs en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau de l'air ascendant et descendant. Des résultats très probants ont été obtenus pour les flux de H₂O, cela reste plus délicat pour le CO₂, vu les très faibles quantités échangées.

Enfin une bouée ancrée a été mouillée sur la zone pendant un an environ et 21 bouées "Marisonde GT" ont été déployées entre février et avril 2001. Ces bouées mesurent divers paramètres météorologiques et sont équipées de chaînes bathythermiques, qui mesurent la température et la salinité de l'eau de mer en surface et jusqu'à 200 mètres de profondeur. Plus de 80 000 observations ont été effectuées par ces bouées pour alimenter la base de données de la campagne Pomme.



Lever du mât instrumenté de Météo-France à la proue du navire océanographique de l'Ifremer, l'Atalante, avant la campagne Pomme

Eufar – une coordination des avions de recherche en Europe

Eufar est le réseau Européen pour les avions de recherche dans le domaine de l'environnement. Outre la coordination des activités, le programme vise à faciliter l'accès trans-national aux avions, développer l'expertise en mesure aéroportée, et évaluer les besoins de la communauté scientifique en terme de moyens lourds (avion à grand rayon d'action).

L'action majeure conduite en 2001 a été la réalisation d'un site internet pour les utilisateurs scientifiques, qui décrit les performances des avions existants, leur instrumentation, leur coût et les moyens d'accès. Une partie du site est dédiée aux experts, qui pourront y exposer leurs recommandations et informer les utilisateurs sur les ateliers spécialisés organisés avec le concours d'Eufar. Une réunion décisive a eu lieu à Reading en octobre, au cours de laquelle ont été discutées les modalités d'accès trans-national entre opérateurs des avions. Des experts en mesure aéroportée ont été désignés pour coordonner les activités dans treize domaines qui recouvrent des aspects techniques tels que la certification des instruments, et des champs de mesure in situ et par télédétection.



Logo du projet Eufar

Températures de l'eau de mer mesurées à onze profondeurs différentes par une bouée Marisonde GT du 19 février au 7 octobre 2001 pour la campagne Pomme

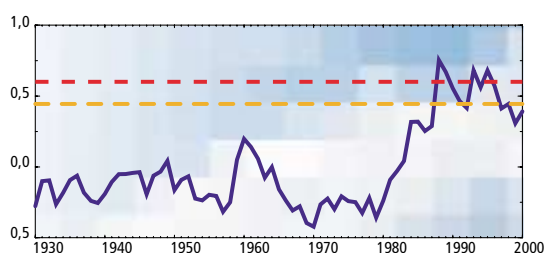
ÉTUDE du climat et de l'environnement de la planète

Entrée en phase de maturité du modèle MOCAGE, première détection du changement climatique à l'échelle régionale, expériences de scénarios et d'impacts, étude de mécanismes : 2001 aura été une année riche dans le domaine du climat et de l'environnement de la planète.

Première détection du changement climatique en France

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et d'aérosols ont probablement contribué à l'augmentation de la température moyenne de la surface de la planète au cours des 50 dernières années. Les méthodes de détection optimale, appliquées à l'échelle planétaire par différents groupes de chercheurs, permettent en effet de mettre en évidence un signal de réchauffement dans les observations qui ressemble à celui qui est simulé par des modèles, lorsque ceux-ci sont contraints par les émissions anthropiques. Cependant, l'impact régional de ces forçages demeure pour une large part inconnu et nous ignorons si un signal anthropique peut être détecté dans les observations à une échelle de typiquement 10000 km².

Une première étude de détection d'un changement climatique à cette échelle a été réalisée par les chercheurs du CNRM sur 70 séries homogénéisées de températures à 2 m couvrant l'ensemble de la France, disponibles auprès de la Direction de la climatologie de Météo-France. Cette étude s'est également appuyée sur un ensemble de trois simulations des changements climatiques, à haute résolution sur l'Europe et la Méditerranée, réalisées avec la version à maille variable du modèle Arpège-Climat.

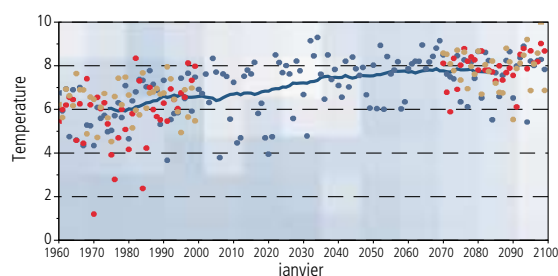


Evolution année par année de la température moyenne de janvier sur la France (points bleus), et moyennes mobiles sur 30 ans (courbe bleue). Les points rouges et mauves correspondent aux scénarios complémentaires. La chronologie est celle du modèle : il ne s'agit ni d'observations, ni de prévisions

Variable de détection d'un changement climatique associée aux tendances sur 30 ans des moyennes estivales du minimum journalier de température de l'air en surface. Cette variable est une mesure de la corrélation entre les tendances observées et les tendances simulées pour l'ensemble de la France. Les deux lignes horizontales représentent des estimations basse et haute du seuil de détection pour un niveau de confiance de 90%

La détection d'un changement climatique s'avère significative avec un niveau de confiance de 90% pour ce qui concerne les tendances sur 30 ans des températures minimales journalières, moyennées sur l'été. Le seuil de détection n'est par contre pas franchi pour les tendances de températures maximales journalières d'été, ni pour les tendances de températures hivernales. Ce succès partiel de la détection est très encourageant puisqu'il montre pour la première fois la détection d'un signal à l'échelle régionale qui ressemble à celui qui est calculé par un modèle climatique régional.

Une simulation de 140 ans à haute résolution sur l'Europe



Les chercheurs de Météo-France ont effectué une longue simulation climatique de 150 ans (1950-2100) en mode couplé océan-atmosphère. Cette expérience permet de disposer d'un scénario d'évolution des températures de surface de la mer et d'extension de banquise en réponse au forçage par les gaz à effet de serre et les aérosols observés (1950-2000) et proposés par le Giec (scénario B2). Dans la longue simulation couplée, la résolution horizontale est d'environ 300 km, ce qui est insuffisant pour représenter même grossièrement le relief de l'Europe. De plus, une simulation sans forçage radiatif montre que le système dérive d'un peu moins d'un degré par siècle.

On a donc refait une simulation avec le modèle Arpège non couplé en résolution variable : de 50 km sur la Méditerranée à 500 km sur le Pacifique sud. Les températures de la mer sont celles observées de 1960 à 2000, puis on utilise les températures de la simulation couplée de 2001 à 2099, après correction de la dérive. Deux périodes présentent un intérêt particulier : 1960-2000 car on dispose d'observations, et 2070-2099 car c'est la période d'impact maximum. Pour chaque période, deux simulations supplémentaires ont été réalisées, en perturbant légèrement l'état initial, de manière à disposer d'un échantillon statistiquement plus riche pour estimer les fréquences d'événements extrêmes.

La figure montre la température moyenne de janvier dans la longue simulation et les simulations additionnelles. On constate qu'il est difficile sur des périodes de moins de 50 ans de discerner un réchauffement

parmi la variabilité interannuelle. Il est toutefois à remarquer que pour le mois de janvier des températures moyennes inférieures à 4°C ne sont plus observées à partir de 2020, tandis qu'il faut attendre 2030 pour obtenir des températures supérieures à 9°C.

Impacts de l'effet de serre et de la déforestation tropicale sur le climat de l'Afrique

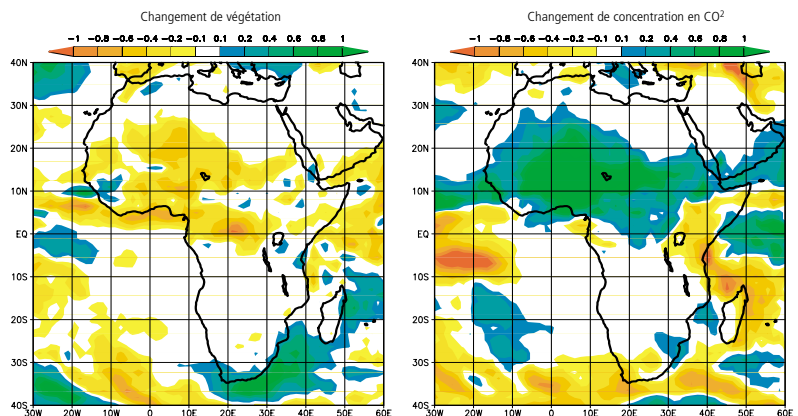
Durant les prochaines décennies, l'Afrique risque de subir une augmentation de la déforestation dont la cause principale serait la recherche de nouvelles terres agricoles en raison d'une forte croissance démographique. Une question se pose alors : quels seront les effets combinés de l'augmentation de l'effet de serre et de la déforestation sur le climat des pays africain ? Pour apporter des éléments de réponse, de nouvelles simulations climatiques à haute résolution sur l'Afrique ont été réalisées à partir du scénario climatique couplé réalisé sur la période 1950-2100 selon le scénario SRES-B2 du Giec.

Afin d'améliorer la prise en compte de la répartition géographique de la végétation et de ses propriétés, la nouvelle base de données de végétation constituée par Météo-France a été utilisée. Trois simulations de 10 ans en mode « time-slice » ont ainsi été réalisées avec la version maille-variable du modèle Arpège-Climat : une simulation de contrôle pour la période présente, une simulation centrée sur le milieu du 21^{ème} siècle avec la végétation actuelle utilisée dans le scénario climatique, et une troisième simulation tenant compte des modifications possibles de végétation (déforestation) en utilisant les cartes de végétation fournies par le modèle d'impact climatique intégré Image2.2 élaboré par le RIVM (Pays-Bas).

Cette étude illustre comment la déforestation tropicale et l'augmentation de l'effet de serre peuvent affecter de manière très différente les conditions climatiques en surface. Les changements anthropiques de la couverture végétale peuvent ainsi modifier régionalement l'impact des gaz à effet de serre, et devront donc être mieux pris en compte dans les prochains scénarios climatiques.

Impacts hydrologiques du réchauffement global

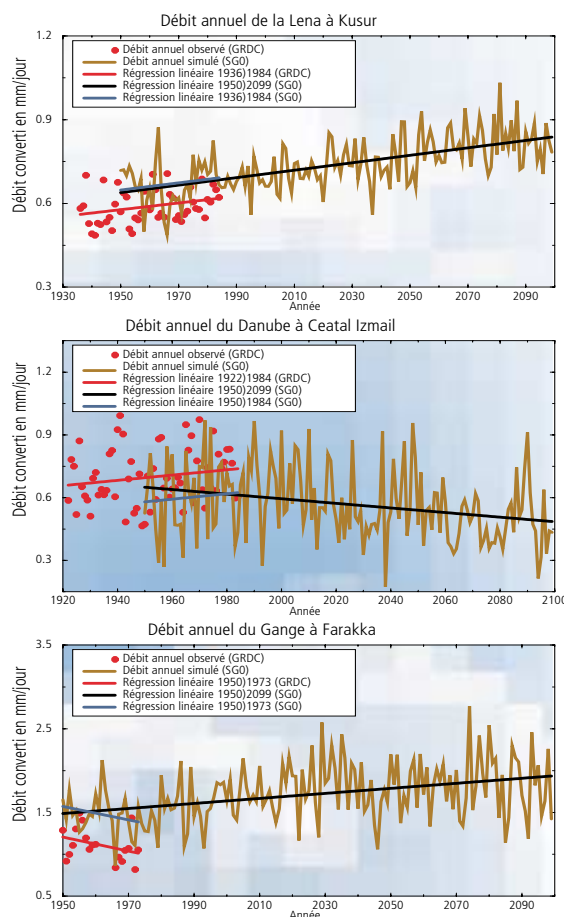
Le schéma de surface Isba, inclus dans le modèle couplé océan-atmosphère Opa-Arpège, répartit les précipitations incidentes entre infiltration et ruissellement de surface, et estime l'évaporation et le drainage profond en fonction de l'humidité du sol. Le ruissellement total, somme du ruissellement de surface et du drainage profond, peut être utilisé pour alimenter une fois par jour le modèle de routage Trip afin de simuler les écoulements en surface. Si le modèle Trip est un



Répartition géographique du changement de précipitation en juin-juillet produit par une modification de la végétation (à gauche) et par l'augmentation des gaz à effet de serre (à droite) vers le milieu du 21^{ème} siècle

maillon indispensable à la fermeture du cycle de l'eau dans le modèle couplé, il permet également de proposer des scénarios hydrologiques à l'échelle des grands bassins versants, en s'appuyant sur les résultats de scénarios climatiques dans lesquels la concentration des gaz à effet de serre évolue selon les observations récentes, puis selon les estimations du Giec au cours du 21^{ème} siècle.

Le modèle couplé Opa-Arpège, forcé par ces concentrations, produit des champs quotidiens de ruissellement total qui sont repris par le modèle Trip afin de simuler l'évolution des débits de 1950 à 2099. Ces débits peuvent être comparés aux débits observés archivés par le Global Runoff Data Centre.



Evolution du débit annuel de la Lena, du Danube et du Gange. Les observations du Global Runoff Data Centre (points rouges) permettent de juger du réalisme du scénario climatique (en noir), et de comparer les tendances prévues aux tendances observées au cours des dernières décennies (en bleu)

Bassin versant de la Haute-Durance : équivalent en eau mensuel du manteau neigeux moyenné sur le bassin versant (figure du haut) et débit mensuel de la Durance à la Clapière (figure du bas). Les traits continus correspondent aux observations, les pointillés (PC, Present Climate) à la simulation du climat présent, et les autres courbes aux différents scénarios climatiques

Bien que les débits annuels simulés soient parfois biaisés, la tendance prévue sur la période d'observation (bleu) est souvent en accord avec la tendance observée (rouge). Cette tendance peut être similaire à celle qui est estimée sur les 150 années de simulation (noir) ou au contraire montrer un signe opposé, suggérant alors que l'impact hydrologique à long-terme du réchauffement global ne s'est pas encore manifesté dans certaines régions du globe, étant masqué soit par la variabilité climatique naturelle, soit par la non-linéarité de la réponse climatique au forçage radiatif, soit par l'évolution des aérosols également prise en compte dans ce scénario.

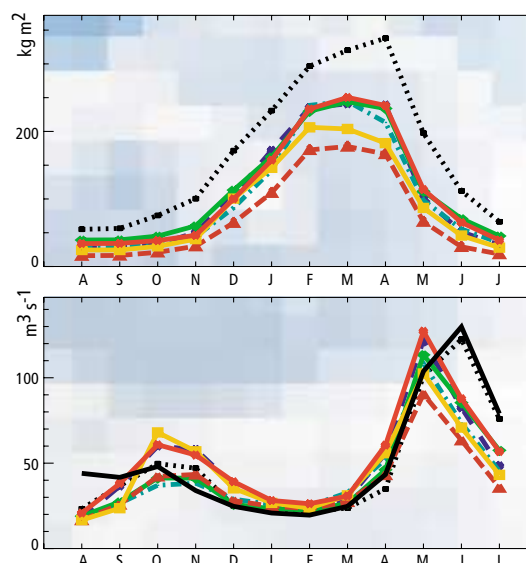
Impact d'un changement climatique sur l'enneigement du bassin versant du Rhône

Dans le cadre du projet Gicc-Rhône (soutenu par le Ministère de l'Environnement), Météo-France a mené une étude pour estimer l'impact d'un changement climatique sur l'enneigement du bassin versant du Rhône. Cette étude s'appuie sur le système de modèles hydro-météorologiques Sim, développé et validé dans le cadre du projet Gewex-Rhône.

Ce système, représentant de manière satisfaisante les observations de hauteurs de neige et de débits des rivières alpines de 1981 à 1997, a été utilisé pour simuler l'évolution de l'enneigement des bassins alpins sous l'effet d'un changement climatique.

Deux des principales incertitudes sur l'évolution du climat sont liées à la régionalisation du réchauffement, peu précise à cause de la résolution des modèles de climat, et aux différentes paramétrisations installées dans les modèles de circulation générale (MCG), tels que les aérosols ou la convection. Afin de prendre en compte ces incertitudes, les résultats de 4 modèles de circulation générale ont été utilisés pour simuler le bilan hydrologique du bassin versant du Rhône. Pour deux de ces scénarios, deux résolutions différentes sont considérées (200 et 50 km).

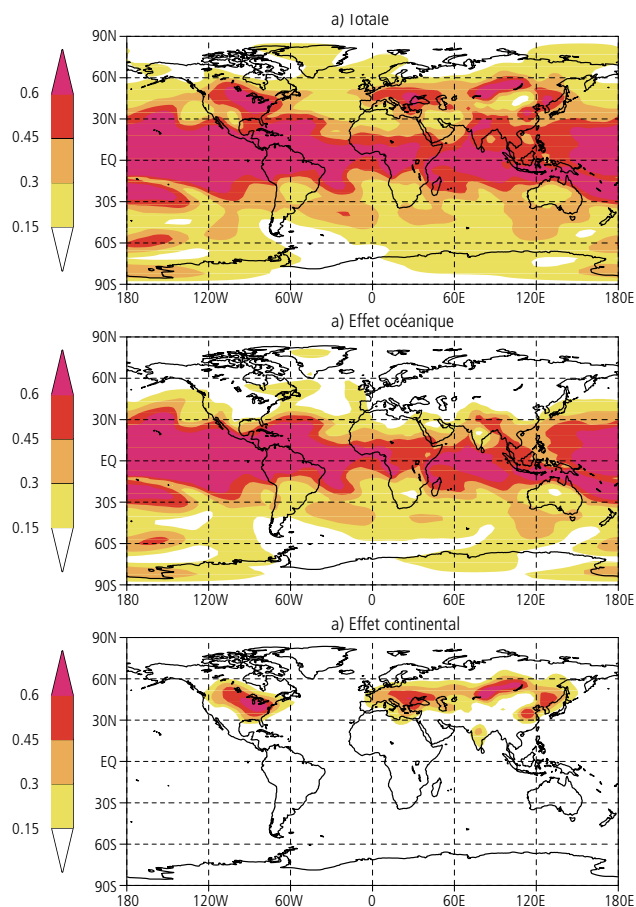
On observe de forts écarts induits par la dispersion des résultats des modèles. Des tendances communes à tous les scénarios peuvent cependant être identifiées : la réduction de l'enneigement est très forte en moyenne altitude et moins marquée au delà de 2000 m. La réduction de la durée de l'enneigement varie de 1 à 2 mois suivant les scénarios et la hauteur de neige moyenne pendant l'hiver décroît de 10 à 40 cm. Dans tous les cas, l'impact sur les rivières nivales est marqué. Dans le cas de la haute Durance (figure), le pic de fonte est avancé d'un mois et les débits estivaux sont fortement réduits (à cause de l'assèchement plus rapide des sols).



Impact des humidités continentales sur la variabilité climatique interannuelle

Prévoir des anomalies climatiques saisonnières à quelques mois d'échéance est aujourd'hui techniquement possible de façon globale grâce à l'utilisation des modèles de circulation générale atmosphérique tels que le modèle Arpège. Pour ce faire, il faut cependant décrire et initialiser de façon réaliste les conditions à la limite inférieure de l'atmosphère, qui sont en partie responsables des anomalies climatiques que l'on cherche à prévoir. C'est notamment le cas des températures de surface de la mer, dont on sait qu'elles jouent un rôle prépondérant au moins sous les tropiques.

L'impact des humidités continentales a été moins étudié en raison du manque d'observations disponibles pour déterminer une climatologie globale de ce paramètre. Il est cependant possible d'aborder ce problème par le biais de la modélisation, en comparant des ensembles de dix prévisions saisonnières (ici de juin à septembre sur la période 1979-1993) dans lesquels le contenu en eau du sol est soit interactif (calculé à chaque pas de temps par le modèle), soit contraint mois après mois à suivre la climatologie du modèle Arpège (par conséquent sans variabilité interannuelle). Une analyse de la variance des saisons simulées permet alors d'estimer les contributions respectives des océans et des continents dans la variance totale d'un paramètre climatique, en l'occurrence la température à 850 hPa sur la figure ci-contre. On constate que les températures de surface de la mer exercent effectivement une influence majeure sous les tropiques, tandis que les humidités du sol ont un impact non négligeable aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord.



Validation climatique d'une nouvelle base de données de sol

Une nouvelle base globale de données de surface a été mise au point à Météo-France, synthétisant plusieurs sources de données pour aboutir à un produit d'une résolution de 1 km. Pour adopter cette nouvelle base dans des simulations climatiques, une validation globale s'avérait nécessaire. Deux simulations climatiques de 10 ans chacune, forcées par des températures de surface de la mer mensuelles, constantes d'une année sur l'autre, ont été réalisées. Ceci permet de considérer ces simulations comme 2 échantillons de 10 éléments indépendants chacun (si l'on ne tient pas compte de la mémoire du contenu en eau du sol qui peut créer de la dépendance entre deux années consécutives).

Pour cette étude, le modèle Arpège/Climat (cycle 22a) a été utilisé dans une troncature T106 uniforme avec grille linéaire (environ 150 km de résolution) et 31 niveaux verticaux. Les températures de surface de la mer proviennent d'une moyenne des observations de Reynolds sur la période 1970-1989.

L'impact climatique de cette nouvelle base est complexe, différentes caractéristiques du sol entrant en ligne de compte. En termes de température à 2 mètres, on constate plutôt une diminution des biais de température sur l'hémisphère nord, avec un refroidis-

sement aux hautes latitudes continentales, ainsi que sur le Kazakhstan et la Mongolie, et un réchauffement sur l'Afrique saharienne. Parallèlement, dans l'hémisphère Sud, on voit une augmentation des biais froids sur les continents africains et sud-américains (excepté sur le nord de l'Argentine où le biais chaud est diminué) et une forte diminution du biais chaud australien. En terme de précipitations, la réponse est moins nette, sauf sur l'Australie où le refroidissement dû au changement d'albédo inhibe les précipitations.

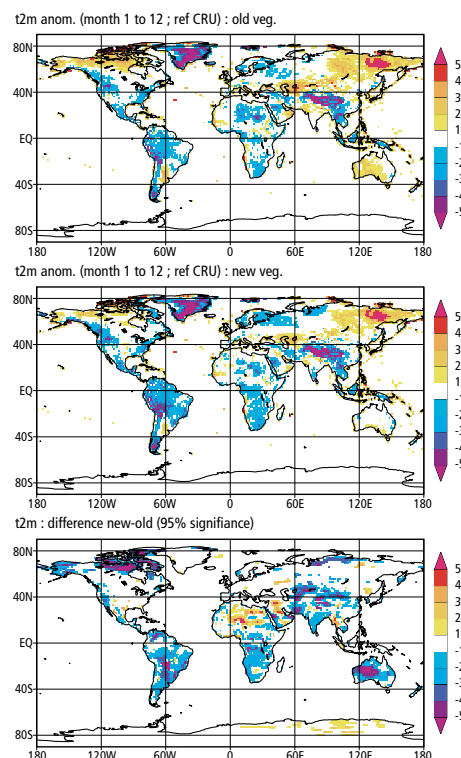
Introduction du routage des fleuves dans le modèle couplé de Météo-France

La première version du modèle couplé de Météo-France comprenait le modèle Arpège-Climat, couplé par le logiciel Oasis du Cerfacs au modèle océanique global Opa du Lodyc, et à Gelato, modèle de banquise dynamique et thermodynamique du CNRM. Ce système couplé a permis de mener à bien une simulation de deux scénarios climatiques sur la période 1950-2100. L'analyse des résultats ainsi fournis a permis de souligner les qualités de ce système, mais aussi certains de ses défauts, d'où la nécessité de poursuivre l'amélioration des différents modèles et de leur couplage.

Afin d'améliorer le modèle initial, un nouveau module a été ajouté au système afin de prendre en compte la durée des transferts d'eau en surface entre le lieu de ruissellement et l'exutoire à l'océan (dans la version initiale, ce transfert était supposé instantané). Ce module est basé sur le modèle de routage Trip développé par T. Oki de l'Université de Tokyo, et fonctionnant pour le moment sur un réseau hydrographique global à 1° de résolution. Ce modèle a été utilisé en 2001 et validé en mode forcé sur de nombreux bassins versants. Il permet maintenant de calculer en temps réel au sein du modèle couplé le parcours de l'eau à la surface des continents. Il faut cependant noter que le module Trip cause des pertes d'eau au système couplé dans certaines régions du globe, lorsqu'un bassin versant n'aboutit pas à l'océan. En réalité, cette eau peut alimenter des nappes souterraines ou être recyclée vers l'atmosphère par évaporation directe sur le fleuve ou après réinfiltration, processus qui ne sont pas encore pris en compte dans les simulations climatiques de Météo-France.

Fraction de variance expliquée par les conditions aux limites pour la moyenne saisonnière (juillet-août-septembre) de la température à 850 hPa simulée sur la période 1979-1993 :

- a) fraction totale,
- b) fraction expliquée par les températures de surface de la mer,
- c) fraction expliquée par les humidités du sol



Anomalies par rapport à la climatologie des températures à 2 m simulées par le modèle Arpège-Climat avec l'ancienne végétation (en haut), la nouvelle base de données de végétation (au milieu), et différence de ces deux cartes (en bas)



Schéma du système couplé comprenant désormais le modèle de routage des fleuves Trip

Prévisions quotidiennes de la qualité de l'air avec Mocage

Mocage, le MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle de Météo-France, est entré dans une phase de maturité en 2001. Ses principales applications scientifiques, de la prévision de la qualité de l'air à l'étude des interactions entre chimie et climat, ont maintenant largement débuté.

En particulier, le modèle Mocage a été utilisé en mode de prévision pendant toute la période estivale. Des prévisions photochimiques jusqu'à 4 jours d'échéance ont été réalisées quotidiennement et les résultats diffusés sur le site internet <http://euler.polytechnique.fr/pioneer>, dans le cadre d'un projet commun avec l'IPSL et le Lisa ; elles utilisaient évidemment en temps réel les prévisions météorologiques opérationnelles de Météo-France.

Ces cinq mois de test ont permis d'acquérir une bonne connaissance des performances du modèle Mocage (figure) et appuient tout à fait la poursuite des prévisions en routine à grande échelle, à une résolution actuellement possible sur la France de l'ordre de 10 km. Ces prévisions présentent un intérêt certain pour les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air dans l'élaboration de leurs prévisions à plus petite échelle, qu'elles diffusent au public.

Les chercheurs de Météo-France poursuivent les travaux en cours en s'attachant notamment au raffinement des sources d'émissions de polluants, afin d'améliorer la prévision quantitative des polluants primaires (oxydes d'azote,...) et des aérosols. Par ailleurs, la simulation des situations observées dans la région Marseillaise au cours de la campagne Escompte permettra de compléter la validation du modèle.

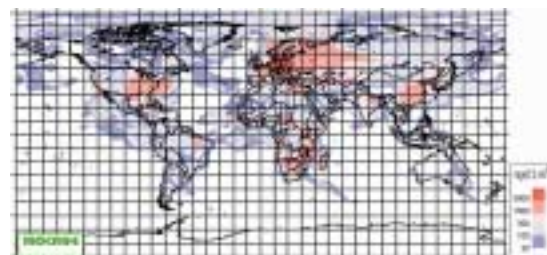
Vers une représentation du cycle atmosphérique de l'aérosol dans Mocage

Les questions relatives au changement climatique et à l'impact environnemental des activités humaines rendent d'actualité l'étude approfondie des aérosols

atmosphériques. A terme, il s'agit à la fois de pouvoir les caractériser, en taille et composition chimique notamment, et de comprendre et analyser leur contribution au système climatique et à la pollution de l'air.

Un module de représentation du cycle atmosphérique des aérosols est en cours de développement dans le modèle Mocage : il vise à décrire l'évolution temporelle des propriétés et de la concentration des aérosols depuis les sources d'émissions, et sous l'effet des processus de transport, des transformations physiques et chimiques, ainsi que des dépôts.

La description de l'aérosol dans le modèle est décomposée par classes de taille et par type d'élément chimique. Une première version complète a été mise en œuvre pour simuler les distributions atmosphériques d'aérosol carboné (suie). Cette simulation prend en compte les émissions, le transport, la sédimentation gravitationnelle, le dépôt humide par captation par la pluie et par coagulation dans les gouttelettes nuageuses, et le dépôt sec en surface, traité de façon très détaillée. Les sources d'émissions sont représentées suivant l'inventaire global GEIA.



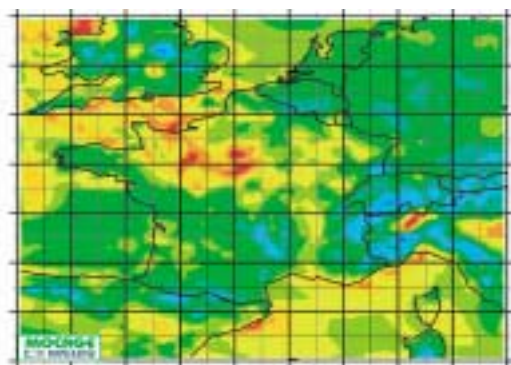
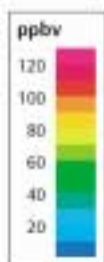
L'ordre de grandeur des concentrations simulées est en bon accord avec les observations disponibles. Les résultats obtenus, qui demandent encore à être approfondis notamment à l'aide des mesures effectuées pendant la campagne Escompte, ouvrent la voie à des simulations, avec Mocage, du système chimique atmosphérique complet, incluant gaz et particules.

Interaction aérosol-nuage-rayonnement - bilan du projet Pace

Pace est un projet européen du 5ème programme cadre, pour la validation de paramétrisations de l'effet indirect des aérosols dans les modèles de climat. Après une première année dédiée à l'établissement de la base de données de validation, le projet est entré dans une phase active de comparaison des simulations réalisées par cinq modèles de climat. Deux réunions ont eu lieu, à Halifax en juin et à Ténériffe en novembre. De sérieuses difficultés ont été rencontrées par les modélistes pour reproduire les nuages de couche limite à partir des champs d'analyse du Ccpmt, y compris en utilisant les termes de rappel sur les profils observés pendant la campagne.

Aérosols atmosphériques (carbone-suie) près de la surface de la Terre simulés par Mocage pour le 20 octobre 2000 à 0 h UTC. L'ordre de grandeur des concentrations simulées est en accord avec les observations disponibles

Champ d'ozone en surface simulé a posteriori par le modèle Mocage pour la journée du 29 juin 2000 à 15 h UTC



L'analyse des données de la campagne Ace-2 a été élargie à l'échelle des modèles (60 km) et de nombreux résultats originaux ont été obtenus. Ils sont présentés dans une nouvelle série de six articles en cours de rédaction. Pour le dernier semestre, il a été décidé de se focaliser sur les paramétrisations physiques et leur capacité à représenter l'effet indirect des aérosols, lorsque la résolution verticale est progressivement dégradée. Enfin, l'apport des paramétrisations diagnostiques de nuage sous-maille verticale sera précisément mesuré, comme alternative à l'amélioration de la résolution verticale.

El Niño et la couche de mélange océanique

Le phénomène El Niño/Oscillation Australe est une composante majeure de la variabilité interannuelle du système couplé océan-atmosphère dont les mécanismes de déclenchement ne sont pas encore parfaitement compris. Dans ce contexte, une étude destinée à expliciter les processus physiques mis en œuvre lors de la phase initiale d'un événement El Niño a été entreprise.

Cette étude repose sur l'utilisation d'un modèle couplé océan-atmosphère, limité au Pacifique tropical, permettant de réaliser des expériences de sensibilité en introduisant, dans une simulation de référence, la composante dynamique d'un unique coup de vent d'ouest idéalisé.

L'analyse de ces expériences est effectuée via deux approches complémentaires. La première consiste à effectuer un bilan de chaleur dans la couche mélangée océanique afin d'identifier les processus majeurs impliqués dans la formation et la propagation vers l'est de l'anomalie de température qui se forme en profondeur. Les contributions linéaires et non linéaires des termes d'advection sont en particulier explicitées et quantifiées. La deuxième approche vise à caractériser les ondes océaniques impliquées dans le réchauffement de surface simulé dans l'est du bassin par le biais d'une méthode d'analyse statistique locale : l'analyse de Gabor. Cette méthode permet dans un premier temps d'isoler la partie propagative du signal (les ondes) de sa partie stationnaire (le cycle saisonnier), puis d'accéder aux caractéristiques ondulatoires (fréquence, nombres d'ondes zonaux et méridiens) locales des ondes océaniques.

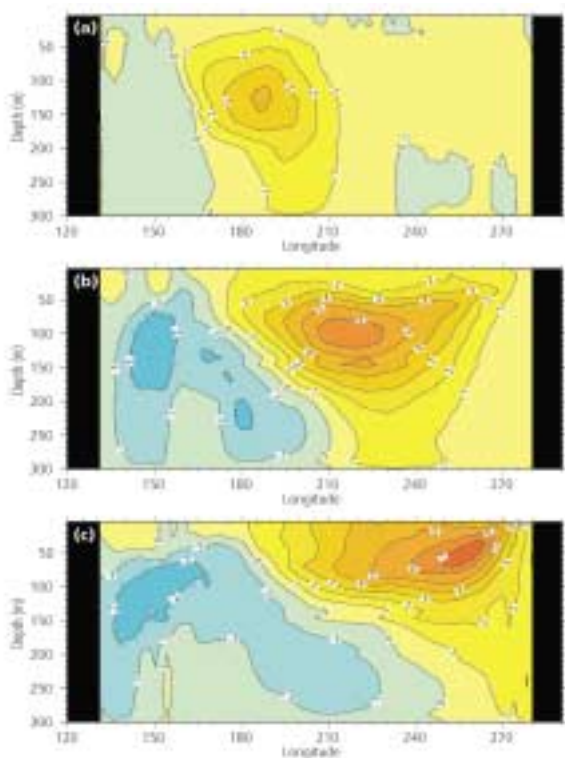
Assimilation de la température de surface de la mer dans un modèle océanique

La température de surface de la mer joue un rôle central dans les échanges de chaleur, de moment et de masse à l'interface air-mer. Aujourd'hui, on dispose d'une vue d'ensemble de la température de surface des océans en temps réel, mais la contribution particulière de ce type d'observation à la modélisation de l'océan superficiel a été jusqu'à maintenant peu évaluée.

Cette évaluation constitue l'objet principal de l'étude entreprise au sein de Météo-France, qui a suivi deux approches : la première utilisant des méthodes simples d'assimilation comme l'insertion et la relaxation; la seconde employant des méthodes d'ensemble pour évaluer d'une part la sensibilité du modèle aux incertitudes dans les flux air-mer, d'autre part la correction apportée par une unique donnée de température de surface de la mer sur la représentation tridimensionnelle de l'océan supérieur.

Les résultats ont montré que l'assimilation de la température de surface de la mer contribue à une meilleure représentation de la structure thermique de l'océan, non seulement en surface mais aussi en subsurface. L'efficacité des techniques simples d'assimilation dépend de l'état initial de l'océan, du régime atmosphérique et de l'échantillonnage des données.

La sensibilité du modèle aux erreurs dans les forçages dépend fortement du champ de forçage affecté par l'erreur, ainsi que de la période d'étude. Les erreurs dans la température de surface de la mer modélisée seront vraisemblablement plus importantes en saison printanière qu'en conditions hivernales, où le brassage induit par le vent au sein de la couche de mélange océanique tend à homogénéiser les erreurs sur toute cette profondeur.



Coupe verticale le long de l'équateur des températures simulées pour les mois de mai, juin et juillet. En mai, on note la formation d'une anomalie de température (+4°C) en profondeur dans l'ouest du Pacifique en réponse au coup de vent d'ouest introduit. Cette anomalie se propage vers l'est en s'intensifiant pour induire en juillet un réchauffement des eaux de surface le long des côtes sud-américaines

DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX

Le mûrissement du conséquent projet de remplacement des avions français de recherche atmosphérique est le fait majeur de l'année dans le domaine instrumental, même si dans le même temps d'autres travaux significatifs et prometteurs ont également contribué à ouvrir l'avenir.

Un nouvel avion pour la recherche atmosphérique

Dans le cadre de leurs activités de recherche, Météo-France, le CNRS/INSU et le CNES mettent en oeuvre des avions spécialisés dans la mesure atmosphérique et dans l'import d'instruments de télédétection. Mais l'ensemble de cette flotte est vieillissant. L'Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection (ARAT), mis en œuvre conjointement par les trois organismes vient d'arrêter sa carrière fin juillet 2001 ; le Merlin IV de Météo-France, après quinze années de service au CAM, devrait cesser toute activité à l'horizon 2003.

Conscient de ce vieillissement général, la communauté scientifique a, dès 1995, étudié le remplacement de

ces avions. Les études de besoins ont montré que le nouvel avion troposphérique devrait permettre de réaliser des mesures simultanées in-situ et de télédétection, réaliser des vols de longues durées (jusqu'à 6 heures d'autonomie), pouvoir recevoir jusqu'à neuf scientifiques et plusieurs instruments lourds (charge utile 2,5 tonnes), voler aussi bien à 30 qu'à 7000 mètres.

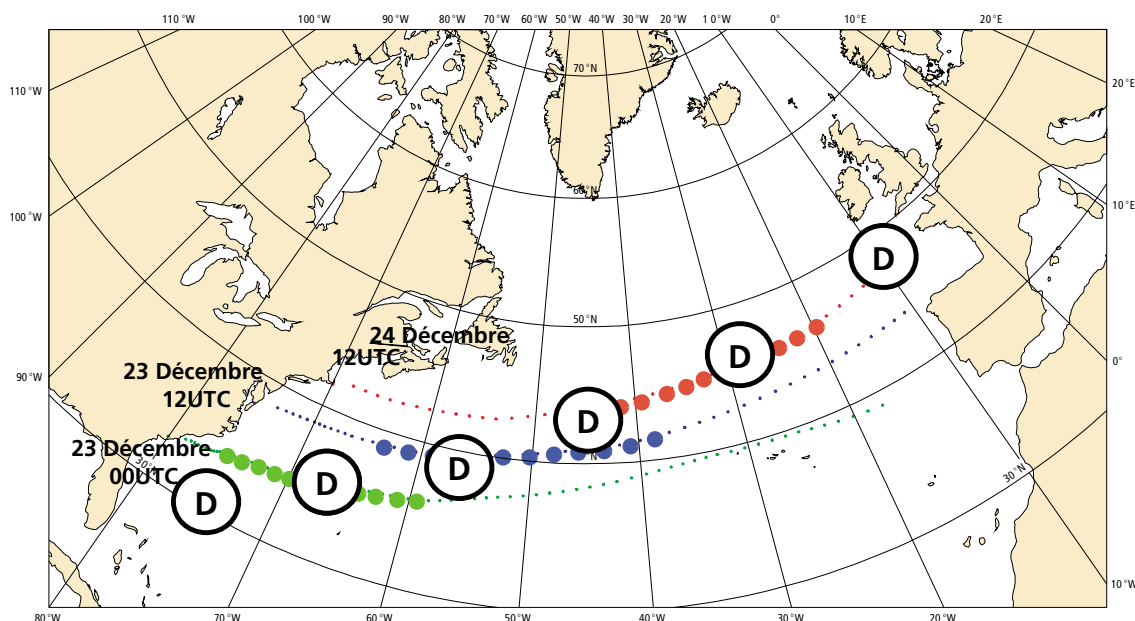
Météo-France a alors décidé de se rendre acquéreur d'un tel avion, et a lancé un appel d'offre début 2001 (CNRS/INSU et CNES lançant en parallèle une opération de rénovation d'un avion existant afin de compléter la flotte au niveau stratosphérique). Les réponses ont été étudiées à partir de septembre, et le lauréat devait être désigné avant fin 2001. L'avion entrera alors en chantier de modification pour environ dix-huit mois, afin de créer les emports spécifiques sous les ailes, les nombreuses ouvertures dans le fuselage, la modification du nez, les câblages d'acquisition, les postes de travail, ...

Alors que le premier vol de cet avion encore mystérieux n'est espéré que pour le second semestre 2003, les demandes de campagnes de mesures commencent déjà à noircir son carnet de vol 2004...

Ballons stratosphériques vecteurs d'observations ciblées : le projet Acacias

Certains phénomènes météorologiques, comme les tempêtes qui touchèrent la France au mois de décembre 1999, restent très difficiles à prévoir, en grande partie à cause du caractère chaotique de l'atmosphère. Dans ces situations, il est nécessaire pour effectuer une prévision précise de disposer d'observa-

Trajectoires virtuelles de trois ballons stratosphériques (en pointillés) dédiés aux observations ciblées (ronds de couleur) pour le cas de la première tempête de Noël 1999. Les dates de lâcher sont le 23 décembre à 00 UTC (tracé vert), le 23 décembre à 12 UTC (tracé bleu), et le 24 décembre à 12 UTC (tracé rouge). La trajectoire de la dépression, du 23 décembre 1999 à 12 UTC au 26 décembre à 00 UTC, est indiquée par pas de temps de 12 h à l'aide du symbole D encadré

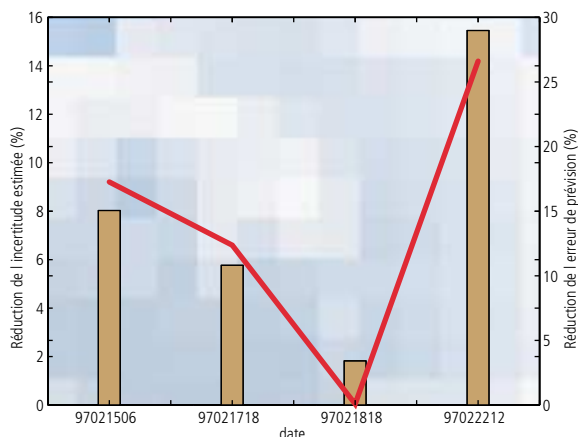


tions de bonne qualité à des endroits et à des instants précis. Il faut donc adapter le système d'observations à la situation du jour.

L'utilité du ciblage des observations a été démontrée à l'occasion du projet Fastex en 1997, et il convient maintenant de concevoir une approche plus réactive du réseau d'observations météorologiques. Pour progresser dans ce sens, il est nécessaire de mettre en oeuvre des moyens de mesures flexibles et peu coûteux. Les ballons stratosphériques de volume assez restreint (moins de 5000 m³) sont des candidats potentiellement intéressants car ils répondent à ces critères. Le but du projet Acacias, conduit en collaboration avec la Division Ballons du Cnes, était de simuler la capacité de ces ballons à effectuer des lâcher de dropsondes à différents instants du cycle d'évolution des dépressions atlantiques.

Les résultats, obtenus sur le cas des tempêtes de Noël 1999, montrent qu'il aurait été nécessaire d'effectuer des lâchers de ballons stratosphériques depuis trois sites situés sur le continent Nord-Américain pour pouvoir suivre correctement ces tempêtes. Un test en vraie grandeur de l'efficacité ces futures plate-formes pourra se faire dans le cadre des actions Eucos ou de la future campagne de mesures internationale Thorpex.

Choix du meilleur déploiement d'observations supplémentaires



Il est bien connu, depuis les travaux d'Edward Lorenz et la popularisation de son fameux « effet papillon », que l'atmosphère peut se comporter comme un système chaotique. Ainsi, dans certaines situations météorologiques, la moindre imprécision sur les conditions initiales va croître très rapidement et avoir un effet considérable à plus ou moins longue échéance sur la qualité de la prévision.

Une manière de tenter d'améliorer les prévisions est donc d'essayer d'optimiser le réseau d'observations météorologiques aux instants et aux endroits cruciaux. Ceci peut être effectué en utilisant les observations

disponibles de manière plus fine (observations issues des satellites par exemple), ou en déployant à la demande de nouvelles observations (observations ciblées). Il va alors être nécessaire de choisir, entre plusieurs configurations possibles, le meilleur déploiement d'observations.

Afin de rendre ce choix plus objectif et plus optimal, un nouvel outil appelé « Sensibilité d'un filtre de Kalman » a été développé. Cet outil permet d'estimer l'incertitude de la prévision dans la direction le long de laquelle les erreurs peuvent s'amplifier le plus. Cette nouvelle méthode prend en compte à la fois la dynamique atmosphérique, le système d'assimilation et les statistiques d'erreurs sur les conditions initiales.

Les premiers tests, réalisés sur des situations de la campagne de mesures internationale Fastex, ont permis de montrer que le meilleur déploiement d'observations supplémentaires, au sens de cette méthode, était aussi celui qui conduisait aux meilleures prévisions.

Mesures d'ozone depuis un TGV : test de faisabilité

La faisabilité de la mesure d'ozone et d'aérosols depuis un Train à Grande Vitesse a été démontrée à travers un test sur TGV réalisé en 2001.

Une rame de TGV a d'abord été équipée par Météo-France, en collaboration avec le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) du CNRS. Puis, pendant une journée, deux aller-retours à travers la Beauce ont servi de banc d'essai afin d'évaluer la possibilité de mesurer l'ozone (Météo-France) et les aérosols (LSCE) à 300 km/h depuis un TGV inséré dans la circulation ferroviaire normale. Les cabines de conduite avant et arrière de la rame avaient été équipées des systèmes de prélèvement et de capteurs ; sur le trajet, en zone totalement dégagée, à proximité de la voie ferrée, deux véhicules laboratoires effectuaient en outre des mesures d'ozone et d'aérosols, afin de fournir pendant tout l'essai des données de références.



Estimation de l'incertitude de la prévision (barres vertes) et réduction d'erreur de prévision (courbe noire) associés aux différents déploiements d'observations ciblées effectuées lors de la campagne Fastex

Mesure de l'ozone atmosphérique depuis un TGV et comparaison avec les mesures d'un véhicule-laboratoire à poste fixe. Le TGV passe sous le pont sur lequel est situé le véhicule-laboratoire

Ce court test a permis de montrer que les mesures d'ozone et d'aérosols sont faisables depuis l'avant d'un TGV et que les résultats sont identiques, à la fourchette d'incertitude près, avec ceux des mesures fixes. La mesure d'ozone peut indifféremment se faire depuis l'avant ou l'arrière de la rame, la mesure effectuée à l'arrière ne présentant pas de biais décelable. Enfin, un début de prise en compte de l'environnement de la voie ferrée, tels que les tunnels ou le croisement des grands axes routiers, a été étudié, et permet déjà d'imaginer la stratégie de validation de telles mesures, dans le cadre d'un réseau opérationnel d'observation d'un nouveau type.

Observation en continu de l'épaisseur de la couche de mélange

En 2001 a été expérimenté le suivi en continu de l'épaisseur de la couche de mélange, ainsi que l'observation de couches d'aérosols, dans les 4 premiers kilomètres de l'atmosphère, à l'aide d'un télémètre de nuage à laser (CT 25 K de Vaisala) modifié. La modification consiste à prendre en compte et à traiter les petits échos qui proviennent de la rétrodiffusion sur les aérosols, et qui sont observables dans le signal brut d'un télémètre de nuages à laser ; jusqu'à maintenant, ces petits signaux étaient éliminés car ils brutaient la classique mesure de hauteur de la base des couches nuageuses.

La première évaluation de ce nouveau moyen d'investigation des basses couches montre qu'il est possible de suivre au pas de la minute la stratification thermique de l'atmosphère, mais aussi d'identifier et de localiser des couches d'aérosols ou des couches de pré-condensation, et de suivre leur évolution dans le temps, à la fois en ciel clair et en présence de nuages. Cette simple modification de logiciel semble très prometteuse, et l'instrument

devrait rapidement trouver une place majeure dans la panoplie des moyens instrumentaux d'investigation en routine de la météorologie des basses couches de l'atmosphère, plus particulièrement dans le domaine de la météorologie urbaine, mais aussi comme aide à l'opérateur pour la caractérisation du temps présent.

Atténuation du rayonnement Ultra-Violet dans les deux premiers kilomètres de l'atmosphère

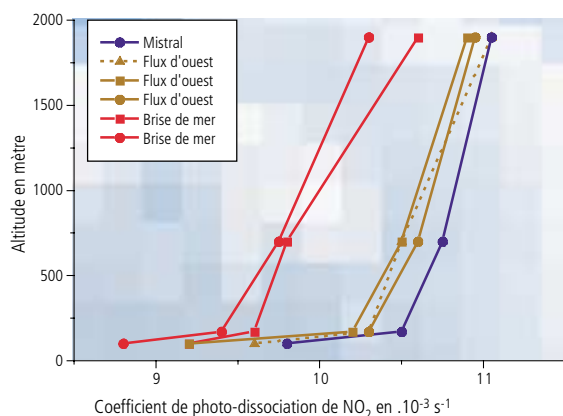
L'atténuation de rayonnement Ultra-Violet dans les deux premiers kilomètres de l'atmosphère a été étudiée dans la région de Carpentras pendant la campagne ESCOMPTE. En juin et juillet 2001, des mesures continues du rayonnement global, du rayonnement UV-B (longueurs d'onde de 280 à 315 nanomètres) et du rayonnement UV-A (320 à 400 nanomètres) ont été réalisées depuis divers sites échelonnés en altitude, de la station de Carpentras (100 m) au sommet du Mont Ventoux (1850 m).

A partir de ce jeu de données, des mesures sélectionnées sur des journées sans nuages autour de midi solaire, pour les principales situations météorologiques typiques d'été (journées avec brise de mer, avec mistral ou en flux d'ouest), ont permis d'établir pour la Provence un début de distribution du coefficient de photo-dissociation du NO₂, en fonction de l'altitude et de ces diverses conditions météorologiques.

Le risque de coup de soleil a aussi été évalué expérimentalement pour ces journées, et les résultats des mesures d'UV-B indiquent qu'au sommet du Ventoux, le coup de soleil était assuré en moins de 15 minutes pour un enfant ou pour les peau sensibles non protégées, vers midi, pendant les situations d'ouest où l'atmosphère était particulièrement limpide.



Télémètre de nuage à laser permettant l'observation continue de la couche des aérosols



Indice UV	coup de soleil assuré en :	
	enfant et peau sensible	Peau normale
9 et +	15 minutes	30'
7 à 8	20'	40'
5 à 6	25'	50'
3 à 4	40'	+ 50'
1 à 2	60'	+ 50'

Distorsion du vent sur les navires océanographiques

Météo-France utilise depuis plusieurs années des navires de l'Ifremer pour ses campagnes de mesures océanographiques. Un mât instrumenté de 11 m, fixé à la proue du navire, mesure à cadence rapide les paramètres météorologiques (vent, température, humidité, rayonnement) afin de calculer les flux turbulents de quantité de mouvement et de chaleur. L'analyse des récentes campagnes a montré que les mesures de vent enregistrées par un anémomètre sonique tridimensionnel situé au sommet du pylône présentaient systématiquement un biais. Bien que corrigée des mouvements du navire par l'intermédiaire d'une centrale à inertie, une erreur sur le module et la composante verticale du vent mesuré au niveau du capteur subsiste.

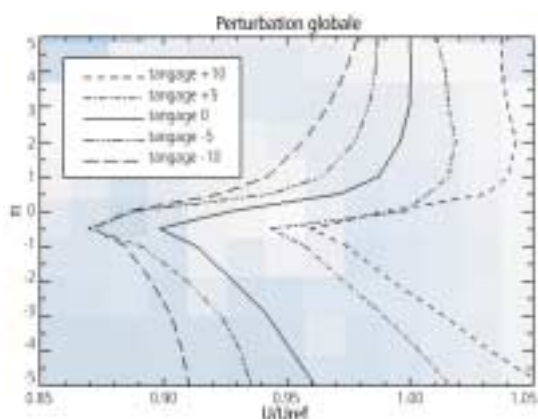
Un programme de recherche, soutenu par le Patom, a été engagé dans le but d'identifier l'origine du biais et de déterminer les coefficients correcteurs à appliquer aux mesures des campagnes pour restituer le vent réel. Des simulations ont été réalisées dans la grande veine hydraulique du Cnrm sur les maquettes des navires Atalante et Thalassa à l'échelle 1/60. Les mesures montrent que la perturbation enregistrée par l'anémomètre sonique est le résultat des effets conjugués de l'enveloppe aérodynamique du navire et de la distorsion du vent créée par le pylône. La perturbation est maximale au niveau du capteur et se manifeste par un déficit de vitesse de 10%. La vitesse verticale est amplifiée et l'angle d'incidence du vent atteint 7°. L'exploration des différentes attitudes du navire (tangage, roulis et azimut du vent) a permis de déterminer les coefficients correcteurs pour restituer le vent vrai nécessaire au calcul des flux. Cette étude a également permis d'optimiser la configuration du pylône afin de minimiser les perturbations aérodynamiques en vue des prochaines campagnes.

Résultats des mesures du coefficient de photo-dissociation de NO₂, effectuées autour de midi solaire, pour les sites du Mont Ventoux (1850 m), du Petit Luberon (700 m), du Réaltor (150 m) et de Carpentras (100 m), pour les situations météorologiques du type mistral, brise de mer et flux d'ouest

Evolution de l'indice UV observée vers midi solaire, dans la région de Carpentras, pour diverses altitudes et pour 3 types de situations météorologiques. A titre indicatif, le risque coup de soleil en fonction de l'indice UV, est donné dans le tableau suivant ci-contre



Visualisation du vent autour du pylône sur la maquette du navire océanographique Atalante



Profil vertical de la vitesse du vent au niveau de l'anémomètre sonique en fonction du tangage

Activités de développement

La conduite d'actions de développement est une des voies du transfert vers les applications des résultats de la recherche "finalisée" menée à Météo-France. Quelques illustrations.

Prise en compte de l'irrigation dans l'hydrologie du bassin Adour-Garonne

Dans le cadre de la modélisation hydrologique du bassin Adour-Garonne sur la période 1986-1995, et suite à la mise à disposition par l'Observatoire de l'Eau des Pays de l'Adour de données d'évolution des surfaces irriguées sur le bassin de l'Adour de 1978 à 1998 (cf. figure) et des sources de cette irrigation (rivière, nappe ou retenues collinaires), l'irrigation des cultures de maïs a été prise en compte afin d'évaluer ses conséquences sur la ressource en eau.

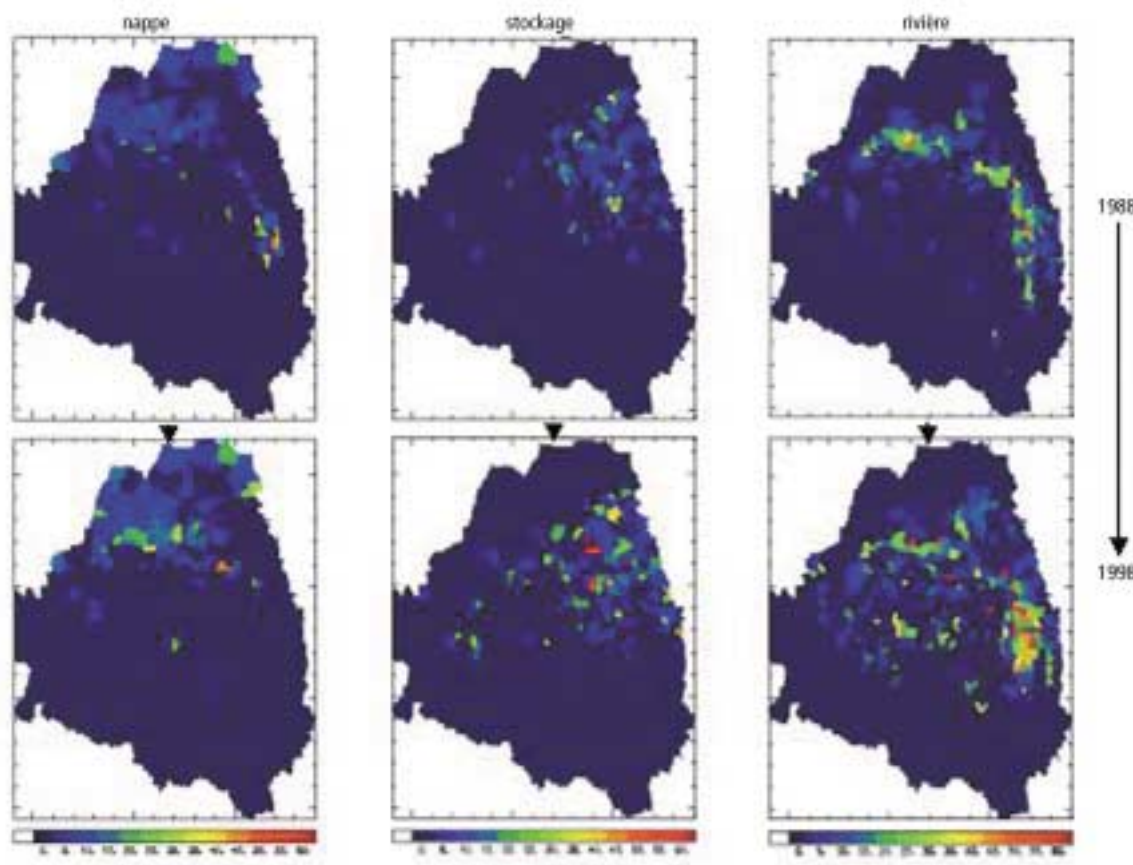
Ne disposant pas des volumes effectivement prélevés, les chercheurs de Météo-France ont mis en place 4 scénarios d'irrigation différents, chacun composé d'un ensemble de règles de décision :

- une conduite idéalisée (irrigation la nuit jusqu'à complète satisfaction des besoins en eau de la culture),
- une conduite proche des pratiques agricoles réelles (irrigation en plein jour, mise en place de tours d'eau effectués en continu indépendamment de l'état hydrique du sol, suspension de l'arrosage après de fortes pluies),
- un scénario "conseils", reprenant les principales caractéristiques du scénario agricole mais en tenant compte du contenu en eau du sol pour déclencher les tours d'eau,
- enfin, basé sur ce dernier scénario, une conduite sous changement climatique.

Les résultats montrent des scénarios "idéal" et "agricole" très consommateurs d'eau, respectivement 420 et 350 millions de m³ en moyenne sur 1988-1995. Les deux scénarios tenant compte de l'état hydrique du sol sont plus économes : 220 millions de m³ contre 245 sous changement climatique, soit une augmentation de 13% due à des sécheresses accrues l'été sous doublement de CO₂. De plus, le scénario "conseils" mis à part, la demande en eau d'irrigation

en haut :
répartition du taux
d'irrigation sur le bassin
en fonction des sources
de l'eau et de l'année
considérée (surface
irriguée/surface totale de la
commune, exprimé en %).

en bas :
évolution de la surface
irriguée (en hectares)
entre 1986 et 1995 sur
le bassin de l'Adour



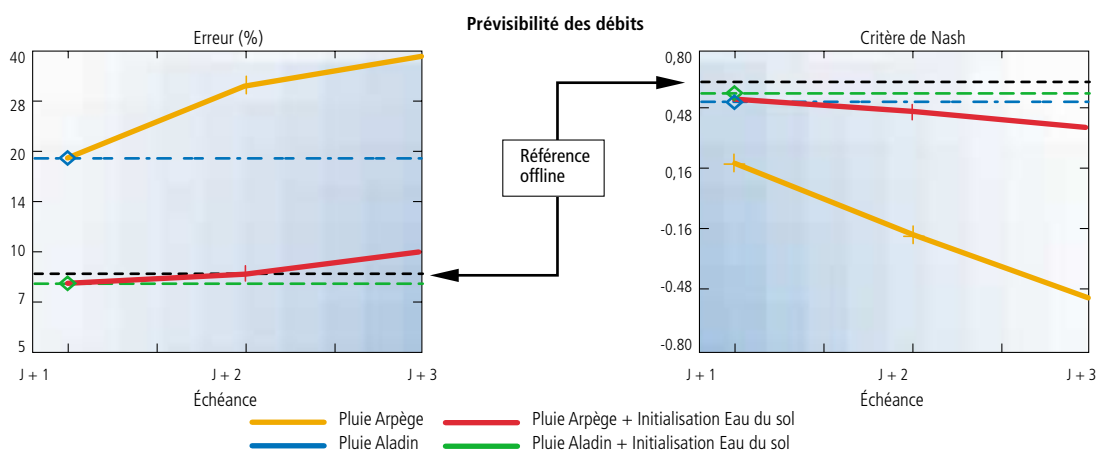
issue des retenues (30% du volume total) est supérieure aux volumes effectivement stockés sur le domaine (données "observatoire").

Prévisibilité des débits du Rhône à l'aide des pluies prévues par Arpège

Les prévisions de pluie du modèle Arpège sont utilisées afin de tester la prévisibilité des débits du bassin du Rhône à l'aide du modèle Isba-Modcou. Les prévisions de pluie à un jour sont généralement proches des cumuls observés, mais leur répartition spatiale fait

couche d'ozone atmosphérique. Cette étude est motivée aussi par l'accroissement constant du trafic aérien commercial (+5% par an), et par les projets de mise en service d'avions supersoniques de seconde génération, dont l'altitude de croisière (18 km environ) se trouverait dans la stratosphère.

Les chercheurs de Météo-France ont donc employé le modèle de chimie-transport atmosphérique Reprobus, couplé au modèle de circulation générale Arpège-Climat, pour modéliser, en 1995 et en 2015, l'impact sur la chimie atmosphérique des oxydes d'azote émis par une flotte combinant aviation subsonique et aviation supersonique.



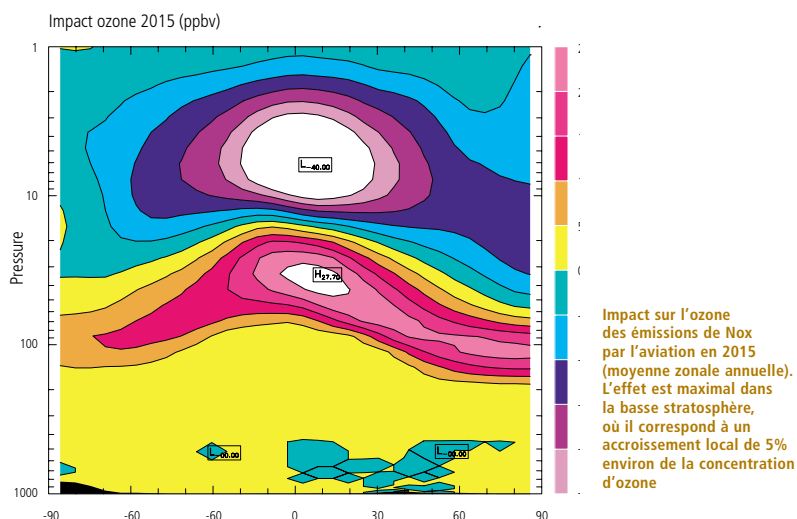
Critère statistique obtenu sur 365 prévisions des débits à 8 stations avec les pluies prévues par Arpège et Aladin, avec ou sans initialisation de l'humidité des sols par la pluie observée. À gauche, l'erreur en volume sur la lame d'eau ; à droite, le critère de Nash, qui égale 1 lorsque les simulations sont parfaites

souvent défaut, conduisant à alimenter le mauvais bassin versant. Les résultats de 365 prévisions des débits de 8 grandes rivières à 1, 2 et 3 jours montrent que l'erreur est assez importante, et augmente avec l'échéance (20 % d'erreur sur les débits prévus à 1 jour, et 40 % à 3 jours). Néanmoins, cette erreur est très fortement réduite (de 8 à 10%) si l'humidité des sols est correctement initialisée chaque jour à partir des observations de pluie de la veille. La prévision des débits à un jour est encore améliorée si on utilise les prévisions du modèle Aladin, grâce à une meilleure distribution spatiale des pluies (résolution spatiale de 10 km au lieu de 30 km pour le modèle Arpège). Cependant, si la qualité des prévisions de débits est acceptable pour les débits moyens, la prévision des cas extrêmes (crues et étiages) est encore limitée.

Impact de l'aviation sur la chimie atmosphérique

Dans le cadre des projets européens Aerochem 1 et 2, Météo-France a contribué à une étude de l'impact sur la chimie atmosphérique des polluants émis par l'aviation. Si ces polluants ne représentent qu'une faible part des émissions dues aux activités humaines (2%), ces émissions présentent la particularité d'être localisées non pas au niveau du sol mais directement en altitude, et possèdent de ce fait un fort potentiel d'impact sur la

Les résultats de cette étude montrent que l'ozone augmente dans la troposphère et la basse stratosphère, alors qu'il est détruit dans la stratosphère (figure). En comparant les simulations de 1995 et 2015, on constate aussi qu'un doublement des quantités d'oxydes d'azote émises se traduit par une amplification d'un facteur 4 environ de l'impact sur l'ozone. Il apparaît en outre que la flotte supersonique, bien qu'elle ne soit responsable selon les scénarios choisis que de 10% des polluants émis par l'aviation, a un impact environ 5 fois plus fort que la flotte



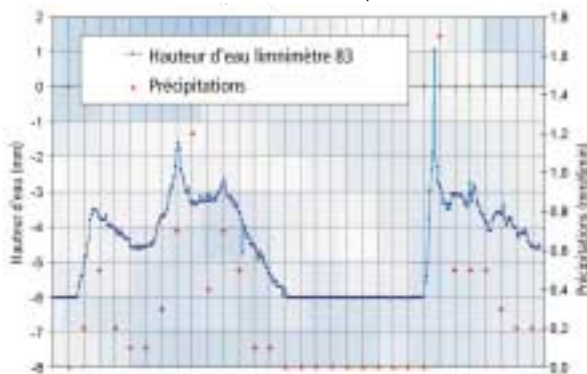
subsonique. Enfin, le couplage totalement interactif entre les deux modèles utilisés montre qu'une rétroaction positive peut s'établir entre l'impact chimique et l'impact climatique.

Etude du ruissellement sur des chaussées routières

L'humidification d'une chaussée routière par la pluie diminue sensiblement l'adhérence des pneus. Ce phénomène a évidemment beaucoup moins d'impact que la neige et le verglas, mais il est beaucoup moins rare dans notre pays, à l'exception des zones montagneuses.

Toutes les précipitations pluvieuses ne diminuent pas l'adhérence de la même façon : cela dépend avant tout de l'intensité et de la durée de la pluie, mais aussi du

Comparaison entre hauteur d'eau sur les chaussées (bleu) et précipitations (rouge) effectuée au Col de Porte (Chartreuse) en 2001



type de chaussée routière. On distingue notamment les pertes d'adhérence dues au ruissellement de l'eau sur une route quand le niveau d'eau dépasse le sommet des granulats présents à la surface de la chaussée.

Une bonne connaissance de la fréquence des situations pluvieuses engendrant des chaussées humides, mouillées ou bien ruisselantes interviendrait sans doute dans le choix des types de chaussée les mieux adaptés au climat de chaque région de France. Dans le cadre du projet Predit "Accidents par temps de pluie", Météo-France et le Cete de l'est (Laboratoire Régional de Nancy) se sont associés pour établir une statistique des hauteurs d'eau sur chaussées. Ceci nécessite avant tout d'établir la climatologie des intensités pluvieuses à partir du réseau pluviographique.

Il faut aussi connaître la relation entre intensité de pluie et état de la chaussée. Pour élargir les connaissances très réduites dans ce domaine, une expérience a été conduite au Col de Porte durant l'automne 2001. Durant plusieurs mois ont pu être mesurées parallèlement l'intensité pluvieuse, la hauteur d'eau sur la chaussée et la quantité d'eau ruisselée. Les dépouillements sont en cours et les premiers résultats laissent penser qu'il sera possible d'établir des relations claires entre ces différents paramètres (voir figure).

Maquettes des tronçons de pile du viaduc, situés à mi-hauteur et au sommet

Gestion locale du risque d'avalanche : exemple de la route du col du Lautaret

En réponse à la demande de la Direction Départementale de l'Équipement des Hautes-Alpes, qui souhaite améliorer la gestion de la viabilité hivernale de la route du col du Lautaret (2057 m), route qui a la vocation d'assurer tout au long de l'année la liaison entre Grenoble et Briançon, Météo-France et le Cemagref se sont associés pour faire une proposition technique commune. Dans cette proposition, Météo-France a pris en charge l'étude de la gestion temporelle du risque d'avalanche, c'est-à-dire des périodes propices aux avalanches.

L'étude se décompose en deux phases. La première, qui a débuté en 2001, consiste à documenter chaque événement avalancheux du passé en paramètres nivo-météorologiques (données observées dans le réseau nivo-météorologique et paramètres issus de la chaîne météo-nivologique opérationnelle Safran-Crocus-Mepa), et ainsi de déterminer des scénarios météorologiques types. Ensuite, une analyse statistique sera faite entre événements avalancheux et paramètres nivo-météorologiques. Les résultats de cette analyse statistique doivent permettre, s'ils sont concluants, de mettre au point, dans une seconde phase, un outil de gestion en temps réel de la viabilité hivernale de la route du col du Lautaret, outil implanté et géré localement et utilisant les sorties opérationnelles de la chaîne Safran-Crocus-Mepa.

Distorsion du vent autour des piles du viaduc de Millau

La société Eiffage TP, en charge de la construction du viaduc de Millau, a confié à Météo-France l'étude de la distorsion du vent autour des piles du viaduc, afin de pouvoir y fixer en toute sécurité des grues à tour de grande hauteur. La flèche de ces grues se trouvant entre 30 et 50 m au-dessus du sommet des piles, leur hauteur totale évolue en cours de chantier pour atteindre au final 300 m. Dans ce site de la vallée du Tarn, au niveau de Millau, les grues vont être soumises à des vents très variés suivant leur hauteur et suivant



la direction du vent, comme l'a montré une précédente simulation hydraulique du site de Millau, réalisée en l'an 2000.

En 2001, une nouvelle étude a été menée dans la grande veine hydraulique du Cnrm sur des maquettes de pile de pont à l'échelle 1/400. Du fait de l'évolution de la section des piles avec la hauteur, trois maquettes ont été utilisées, correspondant chacune à une phase d'avancement des travaux. Les trois directions de vent étudiées 120°, 280° et 320° correspondent aux fréquences de vents forts les plus élevées. Les mesures effectuées par vélocimétrie laser montrent que la perturbation aérodynamique générée par la pile devient négligeable au niveau des têtes de grue. La vitesse du vent est simplement augmentée de 2 à 8% sans modification de direction, ni de turbulence. Par contre, au voisinage immédiat du sommet de la pile, l'accélération du vent atteint 20% et la turbulence dépasse 30%.

Dans le but de faciliter la protection météorologique du chantier, l'étude a permis d'élaborer des coefficients correcteurs qui seront utilisés pour restituer le vent vrai au niveau des grues à partir des mesures effectuées par Météo-France à Millau-Soulobres. Ces coefficients font intervenir la distorsion due aux piles et l'effet de site mis en évidence dans l'étude de site de 2000.

Les bouées dérivantes opérationnelles

Météo-France contribue activement aux réseaux de bouées dérivantes de surface en Atlantique Nord (Egos) et dans l'Océan Indien (Ibpio) : fourniture de bouées, coordination technique et contrôle de qualité des données, notamment. Ces activités s'insèrent dans le cadre du Data Buoy Cooperation Panel institué par l'OMM et la Coi. Depuis quelques années, la plupart des bouées utilisées dans ces réseaux opérationnels sont des flotteurs SVP-B. Le flotteur SVP est une petite bouée sphérique de 40 cm de diamètre, munie d'une ancre flottante de 7 mètres de long centrée à 15 mètres de profondeur. Son déplacement permet la mesure lagrangienne du courant dit "de surface". Le flotteur SVP-B est un flotteur SVP doté d'un baromètre. Les surpressions dues au passage des vagues sur le flotteur – qui est retenu par son ancre flottante –, sont éliminées lors de l'échantillonnage. Le flotteur SVP-B effectue ses mesures toutes les heures : pression atmosphérique et tendance sur 3 heures, température de surface de la mer. La transmission des données se fait via le système Argos.

En 2001, Météo-France a fourni 12 flotteurs SVP-B (et dérivés) pour le réseau Atlantique Nord et 5 pour l'Océan Indien. Comme chaque année, dix baromètres ont été financés pour équiper des flotteurs SVP américains déployés dans l'Océan Indien tropical comme support à la surveillance cyclonique dans cette



Un flotteur SVP-B en mer. On n'aperçoit que la partie émergée du flotteur. L'ancre flottante n'est pas visible

région. A la fin de l'année 2001, on comptait 25 bouées dérivantes opérationnelles, financées en totalité ou partie par Météo-France, dans ces deux réseaux.

Mini station automatique pour navire d'opportunité

Afin de compléter les moyens d'observation météorologique en mer, une mini station automatique, pouvant être aisément installée à bord de nombreux navires, a été développée et testée en 2001 par les chercheurs de Météo-France. Cette station simple, baptisée Minos, est peu coûteuse en investissement et en fonctionnement par rapport à des systèmes plus complets. Elle est inspirée du concept "flotteur SVP-B" qui est la bouée dérivante la plus employée dans le monde. Son objectif est simple : il s'agit de mesurer 2 ou 3 paramètres avec le moins de contraintes possibles vis-à-vis du navire et de son équipage.

La station Minos est principalement composée d'un baromètre, d'une sonde de température de l'air sous abri, d'un récepteur GPS et d'un émetteur Argos. Un afficheur optionnel peut être placé à la passerelle. Toutes les heures, la station fournit sa position, la pression atmosphérique et sa tendance au cours des 3 dernières heures, la température de l'air, ainsi que la direction et la vitesse du navire.



La station automatique Minos développée par Météo-France

Deux prototypes réalisés par la société Serpe près de Lorient, ont été testés avec succès. Le premier a été placé sur le navire océanographique Thalassa, déjà équipé d'une station Batos. Des comparaisons, effectuées entre les deux systèmes, ont permis d'améliorer et de valider la station Minos. Le second a été placé à bord du porte conteneur Matisse de la CMA-CGM qui effectue un tour du monde tous les 3 mois. Ses données horaires sont transmises en temps réel sur le SMT. Quatre nouvelles stations devraient être opérationnelles en 2002.

Visualisation Synergie des champs d'analyse Diaggpack pour la température (isolignes en rouge, intervalle 2° C) et le vent (en rouge) superposés à l'imagerie radar (seuillée pour des précipitations > 6,5 mm/h) pour le 15 Août 2001 à 18 utc. Les observations sont pointées en noir. La partie la plus active du système convectif concerne les départements du Cher et de l'Allier

Vers une mise en exploitation du produit RDT (Rapid Developing Thunderstorms)

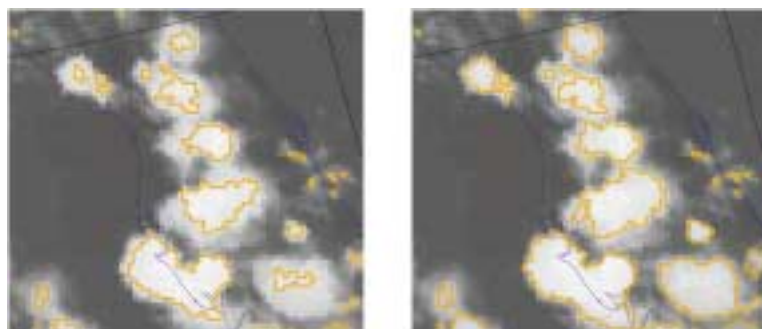
Dans le cadre du Saf-Nowcasting (Centre d'Applications satellitaires dédié à la prévision immédiate) d'Eumetsat, Météo-France a développé le produit RDT : outil d'analyse automatique de la convection basé sur l'utilisation de données satellitaires et réalisant un suivi précoce et une caractérisation des systèmes convectifs.

L'année 2001 a été marquée par la fin des activités de prototypage et la livraison à Eumetsat d'une première version du logiciel permettant d'obtenir ce produit. Ce logiciel sera diffusé à tous les services météorologiques nationaux des états membres d'Eumetsat en 2002.

En parallèle, des améliorations visant à augmenter encore la précocité de détection et de suivi des systèmes convectifs ont été validées. Parmi ces améliorations, la plus conséquente a consisté à changer de méthode de détection des systèmes nuageux. La solution retenue conduit à une bien meilleure représentation de l'extension horizontale des systèmes nuageux tout en améliorant le suivi des très petits systèmes.

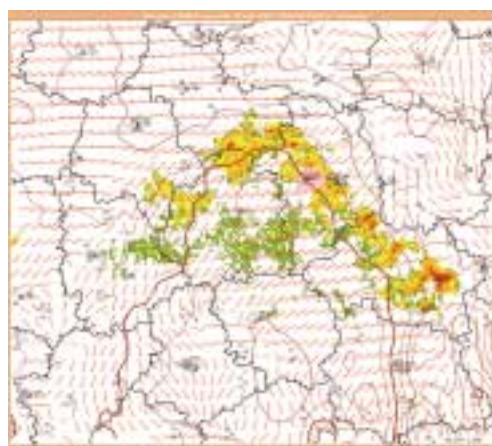
Enfin, une production opérationnelle du produit RDT est effective à Météo-France depuis la fin 2001, et permettra aux prévisionnistes d'utiliser ce nouvel outil dès 2002. La production actuelle se limite aux seules données du satellite Météosat (une image toutes les 30 minutes), mais utilisera très prochainement les données "Rapid-Scan" du satellite Météosat, disponibles toutes les 10 minutes.

Comparaison des contours (lignes oranges) des systèmes nuageux détectés avec l'ancienne (à gauche) et la nouvelle (à droite) méthode de détection. Les contours sont superposés sur l'image du satellite Goes du canal 10.8 microns du 14/07/99 à 2052 UTC.



Analyses à Mésos-échelle des observations près de la surface

Mieux utiliser les observations existantes, mettre en place des outils de prévision à très courte échéance, étaient parmi les objectifs de la prometteuse action de faisabilité, et d'évaluation de l'apport pour le prévisionniste régional, d'analyses méso-échelle fréquentes (vent, température et humidité près du sol, et diagnostics de convection), pilotée en 2001 par le CNRM.

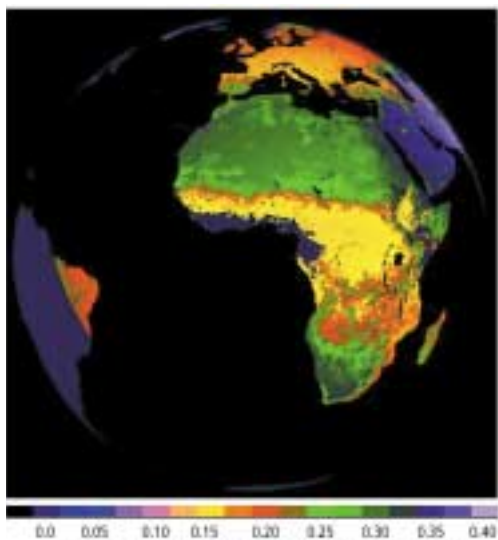


Après réglage spécifique de l'outil d'interpolation optimale "diagpack", et études de cas associant des prévisionnistes régionaux (Diric, Diro, Dirse), l'action a organisé une expérimentation en août et septembre 2001 : les services pilotes interrogeaient systématiquement leur stations automatiques à fréquence horaire, et recevaient en retour les analyses en temps réel (H+30) sur leurs postes Synergie opérationnels.

Hors les limitations de tout système d'analyse, les "expérimentateurs" ont reconnu la qualité et l'intérêt des champs analysés, plus parlants que le semis des pointages, et exhibant souvent des structures à méso-échelle pertinentes et informatives. Ainsi, les analyses de la situation du 15 août 2001 permettent de visualiser les caractéristiques méso-échelle de la ligne de grain qui a traversé la France : convergence à l'avant, front de rafale, fort gradient horizontal de température (> 10° C / 100 km), divergence et fort refroidissement à l'arrière, du aux "downdrafts" et à l'évaporation des précipitations. Ces visualisations permettent de faire plus facilement le lien avec les modèles conceptuels de système convectif et les circulations méso-échelle tridimensionnelles associées. L'utilisation la plus plébiscitée est celle de la comparaison analyse/prévision Aladin courte échéance (4 à 9 heures), à des fins de contrôle et éventuellement de recalage de la prévision.

Le programme SAF pour l'Analyse des Surfaces Continentales

Le programme SAF (Satellite Application Facility) pour l'Analyse des Surfaces Continentales est soutenu par Eumetsat et placé sous la responsabilité de l'Institut Météorologique du Portugal. Ses objectifs sont tournés vers la prévision du temps et la modélisation du climat. Les principaux produits distribués seront l'albédo, la température de surface, la couverture neigeuse, et le rayonnement. Météo-France prend en charge le développement des produits "albédo" et "rayonnement de surface en ondes courtes", et coordonne la fourniture d'un produit "aérosol".



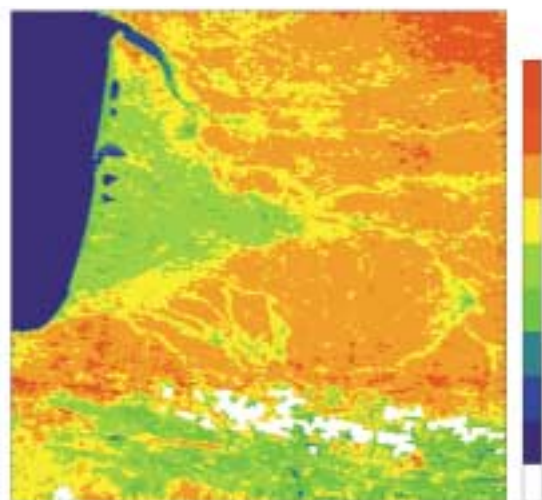
L'année 2001 a vu la finalisation de la phase 2 du projet, comprenant une description des algorithmes de traitement et des méthodes pour la production et la validation des paramètres, ainsi que la fin des développements algorithmiques d'un prototype. Le plan de gestion et de structure pour la réalisation des tâches de la phase 3 (Développement et Mise en Application) a également été défini. Des jeux de données virtuelles simulant les observations du capteur Seviri de Météosat Seconde Génération ont été produits à partir de l'orbitographie MSG, de la base de données de signatures angulaires Polder, d'une statistique d'occurrence des nuages, d'une carte de la végétation, et d'un code de transfert radiatif pour la végétation. Un exemple est montré sur la figure jointe. Ces données servent actuellement à tester l'efficacité de l'algorithme d'inversion pour l'albédo. Une étude menée en parallèle a montré qu'un jeu restreint optimal d'observations permettait de restituer l'albédo avec la précision requise. Une conférence invitant les utilisateurs aura lieu au printemps 2002 et permettra de mieux cibler leurs besoins en termes de définition, spécification, et réalisation de produits.

Cartographie de l'occupation des sols et cartes d'albédo sur la France à partir des données Spot/Végétation

Durant la dernière décennie, les données du capteur Noaa/Avhrr ont été utilisées pour obtenir des cartes globales de la végétation, à partir desquelles on s'est attaché à dériver les paramètres utiles à l'étude du climat et à la prévision numérique du temps. L'avènement de capteurs tels que le radiomètre "Végétation" permet de disposer d'une imagerie de meilleure qualité, à la fois géométriquement et radiométriquement. Des études sont maintenant possibles grâce à la mise à disposition de la communauté scientifique du jeu de données VEGA2000 qui représente un an de données globales de l'instrument "Végétation".

L'activité de Météo-France liée au projet "Végétation" comprend deux volets. D'une part, elle s'inscrit dans le cadre du programme Global Land Cover 2000 dont l'objectif est la réalisation d'une carte globale d'occupation des sols à la résolution du kilomètre, dont la réalisation pour le domaine France est placée sous la responsabilité du Cnrm. La méthode de classification utilisée est statistique et se fonde sur l'analyse des données quotidiennes de la réflectance des canaux visible, proche et moyen infra-rouge, et de la fourniture décadaire de l'indice de végétation Ndvi. Les premières cartes obtenues montrent un gain notable de discrimination des types de surface par rapport à celles tirées de Noaa/Avhrr.

D'autre part, des travaux sont menés en parallèle à partir du même jeu de données VEGA2000 afin de constituer un produit "albédo global" à la résolution du kilomètre. Pour cela, on applique un modèle de correction directionnelle sur les données de réflectance des canaux visible et proche infra-rouge. Les premières cartes d'albédo décadaire sur différentes régions françaises montrent des résultats encourageants.



Simulation des réflectances du canal visible HRV de l'imageur Seviri pour le disque vu par Météosat Seconde Génération

Première carte d'albédo du sud-ouest de la France obtenue à partir des données du capteur "Végétation" embarqué sur le satellite Spot